

TECHNOLOGIE/ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ ZRÁNÍ BETONU A VLIVU OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ

ověřená technologie

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav:

Ing. Karel Hurtig
Ing. David Čítek, Ph.D.
prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
Ing. Arch. Oto Melter

Červenka Consulting s.r.o.:

Ing. Jan Červenka, Ph.D.

	České vysoké učení technické v Praze Kloknerův ústav Šolínova 7 166 08 Praha 6		Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2 461 17 Liberec 1
		Červenka Consulting s.r.o. Na Hřebenkách 55, 150 00, Praha 5	



Tato ověřená technologie je dílčím výsledkem řešení projektu FW06010422 Simulace a navrhování konstrukcí z digitálního betonu v programu FW TREND podporovaného Technologickou agenturou ČR. Ověřená technologie byla součástí pracovního balíčku WP5 Metodika posouzení a návrhu stavebních konstrukcí z digitálního betonu.

Sledování zrání betonu v raném stádiu je zásadní pro zajištění kvality, únosnosti a technologické spolehlivosti betonových konstrukcí, přičemž u 3D tištěných prvků je tento požadavek ještě výraznější vzhledem k postupnému ukládání materiálu bez bednění. Vývoj materiálových vlastností cementového kompozitu je řízen hydratací cementu, která je citlivá na teplotu a podmínky okolního prostředí. Smyslem vývoje ověřené technologie a zařízení pro sledování zrání betonu je získat kontinuální, nedestruktivní a technologicky využitelná data přímo během výroby konstrukce.

Základ technologie tvoří měření a kontrola teploty cementového kompozitu pomocí bodových čidel, bezkontaktních snímačů a termokamer, doplněné o monitoring okolního prostředí. Tato data umožňují nepřímo hodnotit vývoj tuhnutí, rané pevnosti a kvalitu mezivrstevového spojení, které nelze v případě 3D tisku stanovit běžnými laboratorními metodami. V rámci projektu byly testovány a vyvíjeny metody stanovení vlastností čerstvé a tuhnoucí směsi tak, aby bylo možné je reálně aplikovat před, během a po tisku. Výsledkem je vytvoření metodik, jež propojují měření fyzikálních veličin s materiálovým chováním a umožňují řízený, reprodukovatelný a bezpečný proces 3D tisku betonových konstrukcí.

V souladu se smlouvou o využití výsledků projektu je rozdělení práv k výsledku v poměru Červenka Consulting s.r.o. – 10 %, Technická univerzita v Liberci – 10 % a České vysoké učení technické v Praze – 80 %.

OBSAH

1. OBECNĚ	4
1.1 Úvod	4
1.2 Vymezení problematiky	5
1.3 Princip řízení tuhnutí pomocí urychlovače aplikovaného v tiskové hlavě	5
2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM A DOSTUPNÉ PODKLADY	6
2.1 Vliv teploty prostředí a teploty čerstvého materiálu	6
2.2 Zkouška tuhnutí cementové pasty při různých koncentracích aktivní látky	9
3. KONTROLA ČERSTVÉHO MATERIÁLU 3DPC	10
3.1 Charakter materiálu – tixotropní cementový kompozit	10
3.2 Použité měřicí zařízení – Matest Plasticity meter C190	11
3.3 Standardizovaný postup měření po ukončení míchání	11
3.4 Vyhodnocení a význam statistického přístupu	15
4. METODY KONTROLY TUHNUTÍ A JEJICH POROVNÁNÍ	17
4.1 Ruční penetrometr jako metoda pro in situ stanovení green strength	17
4.2 Ultrazvuková metoda a její omezení	19
5. MODEL PREDIKCE ČASU K DOSAŽENÍ LIMITNÍ PEVNOSTI 0,2 MPa	22
6. SYSTÉM MÍCHÁNÍ URYCHLOVAČE A VODY PRO DOSAŽENÍ POŽADOVANÉ KONCENTRACE AKTIVNÍ LÁTKY	23
6.1 Vstupy systému (parametry na ovládacím panelu)	23
6.2 Výstupy systému	23
6.3 Kontrola skutečného dávkování	24
6.4 Ověření vývoje pevnosti v tlaku	25
7. KONTROLA PROCESU ZRÁNÍ MATERIÁLU BĚHEM TISKU	26
7.1 Monitoring teploty pomocí termokamery	26
7.2 Monitoring teploty pomocí zabudovaných čidel	27
7.3 Implementace sledování teploty na tiskovou hlavu	29
8. ZÁVĚR	31

1. OBECNĚ

1.1 Úvod

Sledování zrání betonu v raném stádiu je zásadním předpokladem pro řízení kvality a technologické spolehlivosti betonových konstrukcí, přičemž v případě 3D tištěných prvků nabývá tento požadavek mimořádného významu. Materiál je ukládán postupně v čase, bez bednění a s okamžitým zatížením vlastní hmotností dalších vrstev. Zrání betonu je řízeno průběhem hydratace cementu, která je exotermickým procesem silně závislým na teplotě, vlhkosti a dalších podmínkách okolního prostředí. Technologie určené pro sledování tohoto procesu proto musí umožňovat nejen kontinuální měření fyzikálních veličin, ale také podporovat vývoj metodik pro stanovení rozhodujících materiálových parametrů cementového kompozitu v čase.

Základním monitorovaným parametrem je teplota, která poskytuje přímou informaci o průběhu hydratačních reakcí a nepřímo odráží vývoj tuhnutí a tvrdnutí betonu. Bodové měření teploty uvnitř konstrukce pomocí odporových čidel Pt1000 umožňuje sledovat časový průběh hydratace a identifikovat jednotlivé fáze zrání. Tyto teplotní záznamy tvoří výchozí datovou základnu pro vyhodnocení vývoje materiálových vlastností, zejména v období přechodu z čerstvého do tuhnoucího stavu, který je z technologického hlediska kritický.

Vývoj tuhnutí betonu je tradičně hodnocen pomocí penetračních metod, které stanovují počátek a konec tuhnutí na základě odporu materiálu proti vniku jehly či válečku definovaných rozměrů. Tyto metody jsou však navrženy pro laboratorní vzorky nebo klasické betonářské aplikace a neumožňují kontinuální sledování procesu přímo v konstrukci. V případě technologie 3D tisku je tedy nutné najít nové nebo přizpůsobit existující metody stanovení vývoje tuhnutí materiálu v čase.

Podobná omezení se týkají i reologických metod, zejména rotačních viskozimetrů a reometrů, které poskytují detailní informace o viskozitě, mezích toku a tixotropním chování čerstvých cementových směsí. Tyto metody jsou vhodné pro charakterizaci směsi před tiskem, avšak neumožňují sledovat vývoj reologických vlastností materiálu již uloženého v konstrukci. V průběhu 3D tisku se přitom reologické chování materiálu dynamicky mění v důsledku hydratace, odvodu tepla a vlivu okolního prostředí, což vyžaduje odlišný přístup k hodnocení tuhnutí a zrání.

Z těchto důvodů je v kontextu 3D tisku nutné vyvíjet nové nebo upravené metodiky, které umožní nepřímé stanovení vývoje tuhnutí a dalších materiálových parametrů bez destruktivního zásahu do konstrukce. Teplotní měření představuje jeden z klíčových nástrojů tohoto přístupu. Při vhodné experimentální kalibraci lze teplotní průběh korelovat s výsledky penetračních zkoušek, reologických měření a mechanických testů prováděných na referenčních vzorcích. Tím vznikají vztahy, které umožňují odhadnout stupeň tuhnutí, ranou pevnost nebo únosnost jednotlivých vrstev pouze na základě teplotních dat a času.

Bezkontaktní plošné měření pomocí termokamer dále rozšiřuje možnosti hodnocení tím, že umožňuje sledovat prostorovou nehomogenitu vývoje tuhnutí a hydratace v rámci celé tištěné konstrukce. Navázáním termokamerových dat na bodová měření teploty lze identifikovat rozdíly mezi jednotlivými stopami a vrstvami, které vznikají v důsledku rozdílného časování tisku nebo lokálních změn okrajových podmínek. Tyto informace jsou zásadní pro vývoj metodik hodnotících mezivrstevové spojení a lokální variabilitu materiálových vlastností.

Součástí komplexního přístupu je rovněž sledování okolního prostředí, zejména teploty vzduchu, relativní vlhkosti a proudění, které významně ovlivňují rychlost vysychání

a ochlazování povrchu betonu. Zahrnutí těchto vlivů do vyhodnocovacích metodik umožňuje zpřesnit interpretaci teplotních záznamů a oddělit materiálové chování od vlivů prostředí.

Technologie a zařízení pro sledování zrání betonu, doplněné o cílený vývoj metodik pro hodnocení tuhnutí, reologických a mechanických vlastností cementového kompozitu, tak vytvářejí nezbytný základ pro řízený 3D tisk betonových konstrukcí. Vzhledem k omezené použitelnosti běžných laboratorních metod v reálném tiskovém procesu představuje tento přístup cestu k objektivnímu, kontinuálnímu a nedestruktivnímu hodnocení vývoje materiálu, které je klíčové pro zajištění kvality, bezpečnosti a reprodukovatelnosti 3D tištěných betonových prvků.

1.2 Vymezení problematiky

V technologii 3D tisku cementových kompozitů je jedním z klíčových parametrů úspěšného tisku řízené tuhnutí a nárůst tzv. *green strength* (počáteční pevnosti) bezprostředně po extruzi materiálu. Požadovaná rychlost tuhnutí musí být dostatečně vysoká, aby extrudovaná vrstva unesla vlastní tíhu a zatížení od následně ukládaných vrstev, zároveň však nesmí být příliš rychlá, aby nedocházelo k ucpávání tiskové hlavy, zhoršení soudržnosti mezi vrstvami nebo k nestabilnímu průtoku materiálu.

Tuhnutí čerstvé cementové směsi je ovlivněno řadou faktorů, mezi které patří zejména teplota prostředí, teplota čerstvého materiálu a dávkování urychlovače tuhnutí. V této práci je řešena problematika vlivu teploty prostředí a teploty čerstvého materiálu před aktivací urychlovačem tuhnutí na bázi síranu hlinitého, který je aplikován přímo v tiskové hlavě těsně před extruzí. Tento způsob aktivace umožňuje řízení tuhnutí až v posledním kroku před ukládáním materiálu, čímž se zvyšuje flexibilita procesu a možnost operativní regulace v průběhu tisku.

Cílem je vytvořit systém kontroly tuhnutí po extruzi a navrhnout princip korekčních zásahů (úprava dávky urychlovače nebo úprava teploty čerstvého materiálu) na základě měření vývoje pevnosti v čase a s ohledem na aktuální teplotní podmínky.

1.3 Princip řízení tuhnutí pomocí urychlovače aplikovaného v tiskové hlavě

Použitý urychlovač tuhnutí je vodný roztok síranu hlinitého, který je dávkován do čerstvého cementového kompozitu v tiskové hlavě bezprostředně před extruzí. Vzhledem k tomu, že tuhnutí a nárůst pevnosti probíhá již v řádu minut, je pro stabilní tisk nutné znát rychlost vývoje pevnosti v krátkých časech (typicky 10 až 90 minut po smíchání s urychlovačem, resp. po extruzi).

Z praktického hlediska lze stav tuhnutí a nárůst green strength hodnotit dvěma přístupy:

Přímé stanovení pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech (např. trámečky 40×40×160 mm dle ČSN EN 196-1), které je přesné, ale časově i organizačně náročnější a méně vhodné pro operativní řízení tisku.

In situ měření pomocí:

- a) ručního penetrometru (rychlé, jednoduché, vhodné pro operativní rozhodování),
- b) ultrazvukové metody (UZ) stanovením rychlosti průchodu signálu (plně nedestruktivní, ale s komplikovanější interpretací).

Na základě těchto měření lze odhadnout aktuální pevnost či rychlost tuhnutí a provést korekce procesních parametrů.

2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM A DOSTUPNÉ PODKLADY

2.1. Vliv teploty prostředí a teploty čerstvého materiálu

3D tisk cementových a betonových konstrukcí je v současné fázi výzkumu a vývoje realizován převážně v laboratorních podmínkách, kde jsou environmentální podmínky relativně stabilní a kontrolovatelné. Teplota okolního prostředí se v těchto podmínkách zpravidla pohybuje kolem referenční hodnoty 20 °C. Reálnou teplotu při procesu tisku in situ lze očekávat přibližně ± 10 °C od laboratorní teploty. Z tohoto důvodu byl vývoj technologií a zařízení pro sledování zrání betonu, stejně jako navazujících metodik vyhodnocení, cíleně koncipován a kalibrován pro tento teplotní rozsah. Takto zvolený interval umožňuje reprezentativní zachycení průběhu hydratace cementu a vývoje materiálových vlastností v prostředí, ve kterém jsou experimenty nejčastěji prováděny, a současně vytváří základ pro budoucí rozšíření metodiky na širší spektrum provozních podmínek.

3D tisk cementových kompozitů v exteriéru se zásadně liší od laboratorních podmínek zejména nekontrolovatelností a výraznou proměnlivostí okolního prostředí. Teplota okolního vzduchu se při venkovní realizaci může pohybovat v širokém rozmezí, typicky přibližně od 0 °C až po 30 °C, v extrémních případech i mimo tento interval v závislosti na ročním období a denní době. Teplota samotného cementového kompozitu je pak výsledkem kombinace počáteční teploty směsi, exotermického průběhu hydratace cementu a intenzity tepelné výměny s okolím, přičemž může krátkodobě dosahovat hodnot vyšších než teplota prostředí. V exteriéru navíc významně působí faktory jako sluneční záření, vítr a kolísání vlhkosti, které ovlivňují rychlost ochlazování, vysychání povrchu a tím i průběh tuhnutí a zrání materiálu. Tyto vlivy kladou zvýšené nároky na monitorování teploty jak okolního prostředí, tak samotného cementového kompozitu, a zásadně ovlivňují technologii 3D tisku v reálných provozních podmínkách.

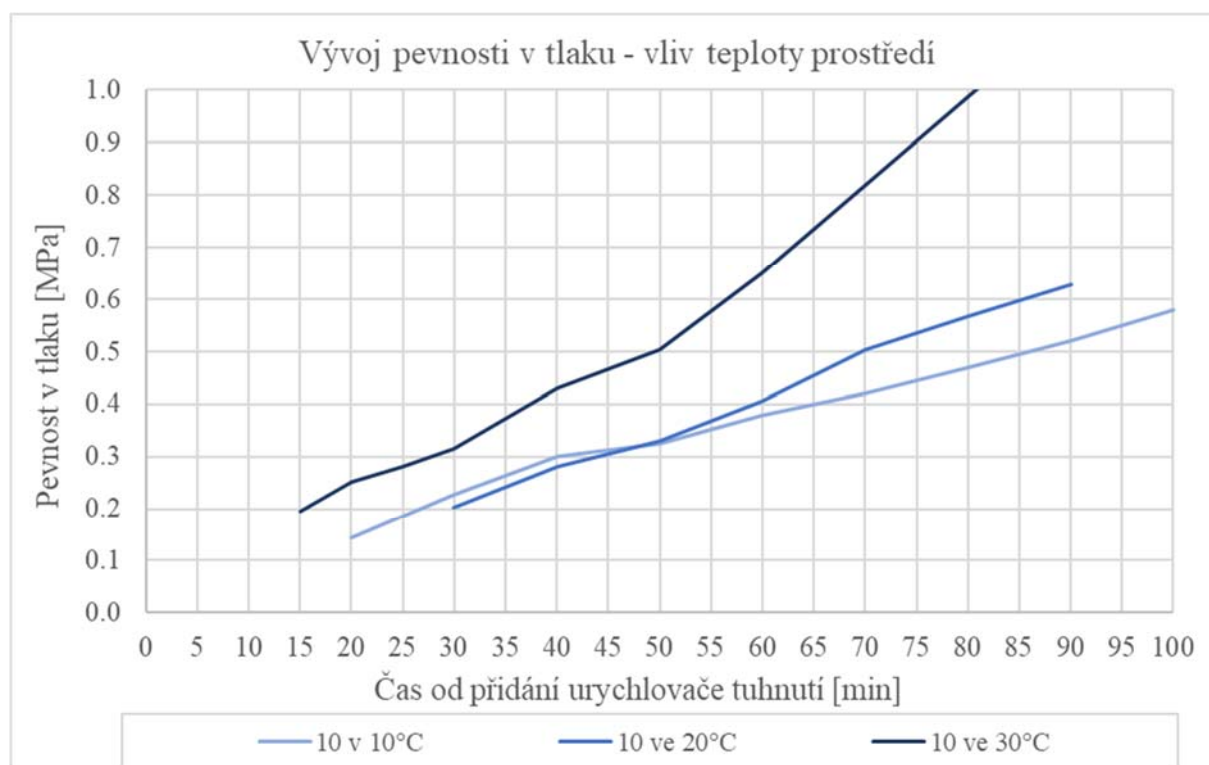
Základní experimentální část byla zaměřena na vliv dvou teplotních faktorů pohybujících se v rozsahu reálného prostředí:

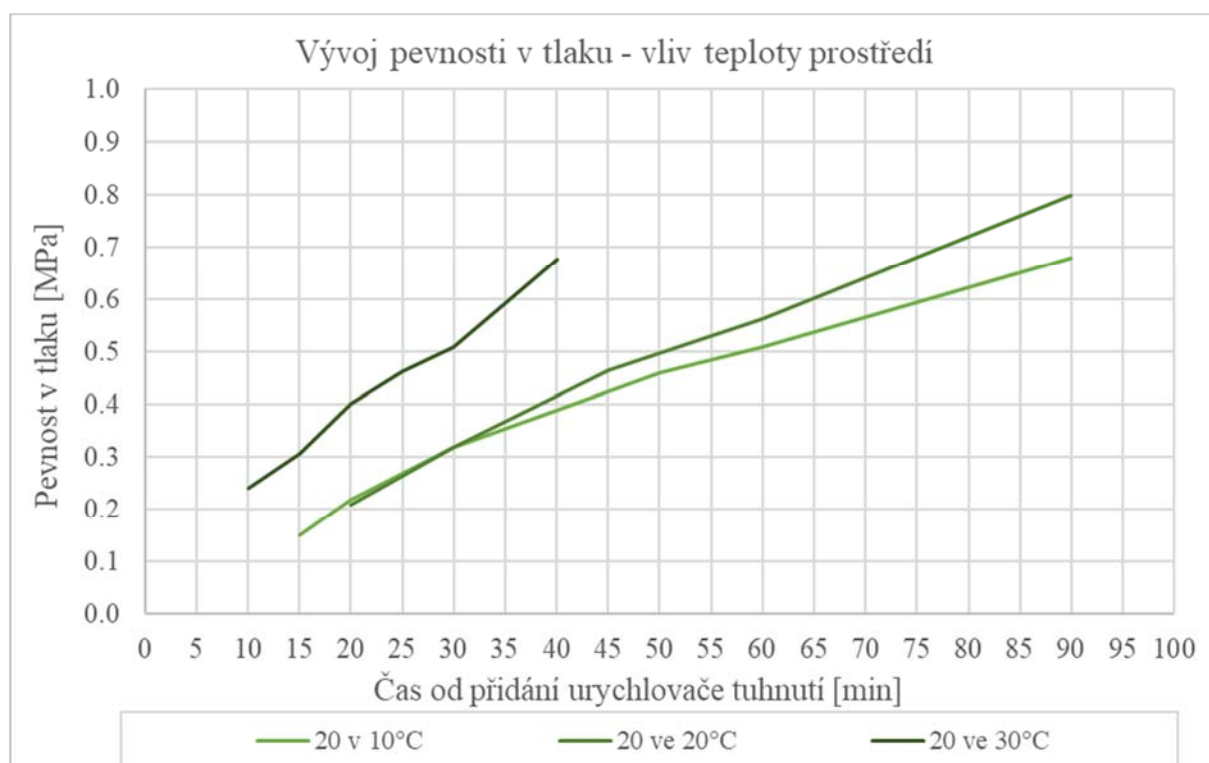
- a) **teplota čerstvého základního materiálu před smícháním s urychlovačem tuhnutí: 10, 20 a 30 °C,**
- b) **teplota prostředí, ve kterém směs tuhne: 10, 20 a 30 °C.**

Bylo tedy vytvořeno celkem 9 kombinací (3×3). Do základního materiálu byl vždy přidán urychlovač tuhnutí v běžné (standardní) koncentraci, se kterou je běžně pracováno při 3D tisku. Pro každou kombinaci byl sledován vývoj pevnosti v tlaku v krátkých časech přibližně od 10 minut do 90 minut od smíchání s urychlovačem. Tabulka 1 uvádí výsledky stanovení pevnosti v tlaku (stanoveno na trámečcích 40×40×160 mm). Tento soubor dat představuje klíčový základ pro pochopení citlivosti systému na teplotu a pro vytvoření predikčního modelu rychlosti tuhnutí.

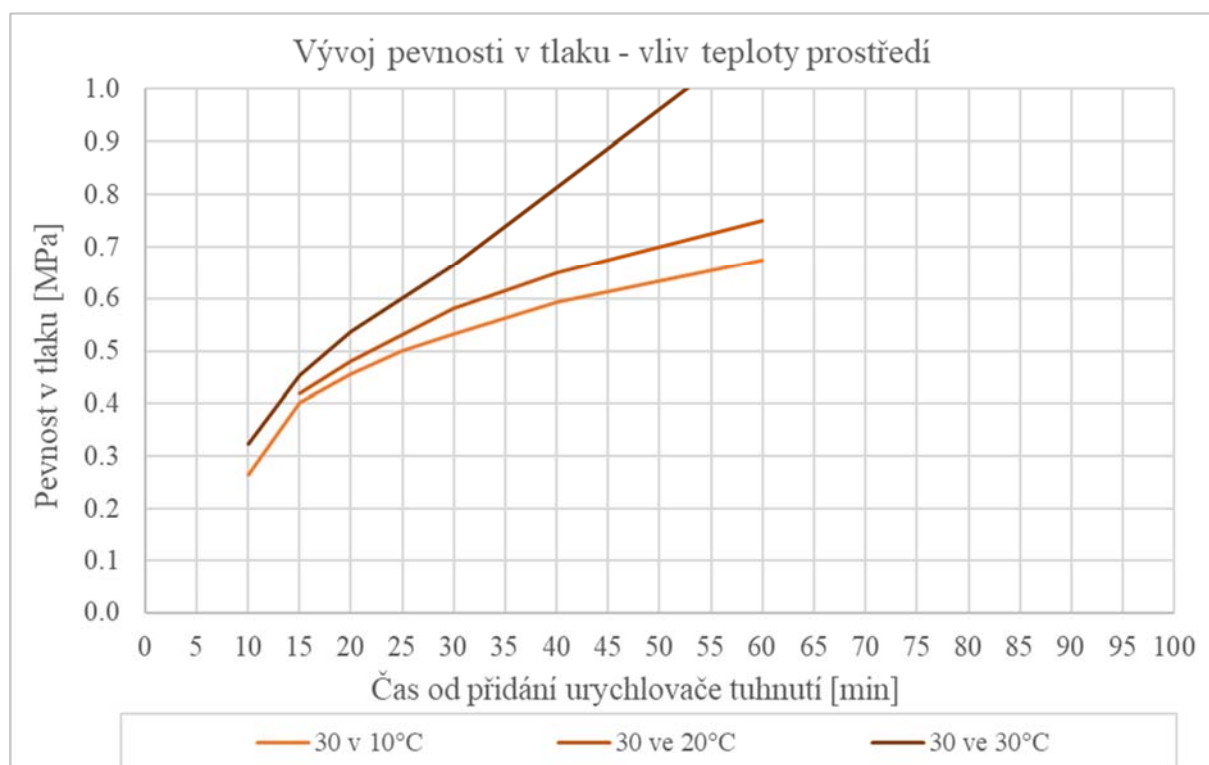
Tabulka 1: Pevnost v tlaku – trámečky 40×40×160 mm

Teplota po zamíchání [°C]	Teplota prostředí tuhnutí [°C]	Čas po smíchání čerstvého materiálu s urychlovačem tuhnutí [min]											
		10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	
		Pevnost v tlaku (T40×40×160) [MPa]											
10	10	-	-	0,1	-	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	
10	20	-	-	-	-	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	
10	30	-	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	-	-	1,2	
20	10	-	0,2	0,2	-	0,3	0,4	0,5	0,5	-	-	0,7	
20	20	-	-	0,2	-	0,3	-	-	0,6	-	-	0,8	
20	30	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	-	-	-	-	-	
30	10	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	-	0,7	-	-	-	
30	20	-	0,4	0,5	-	0,6	0,7	-	0,8	-	-	-	
30	30	0,3	0,5	0,5	0,6	0,7	-	-	1,1	-	-	-	

**Obrázek 1:** Vliv teploty prostředí na závislost nárůstu pevnosti v čase (teplota čerstvého materiálu 10 °C)



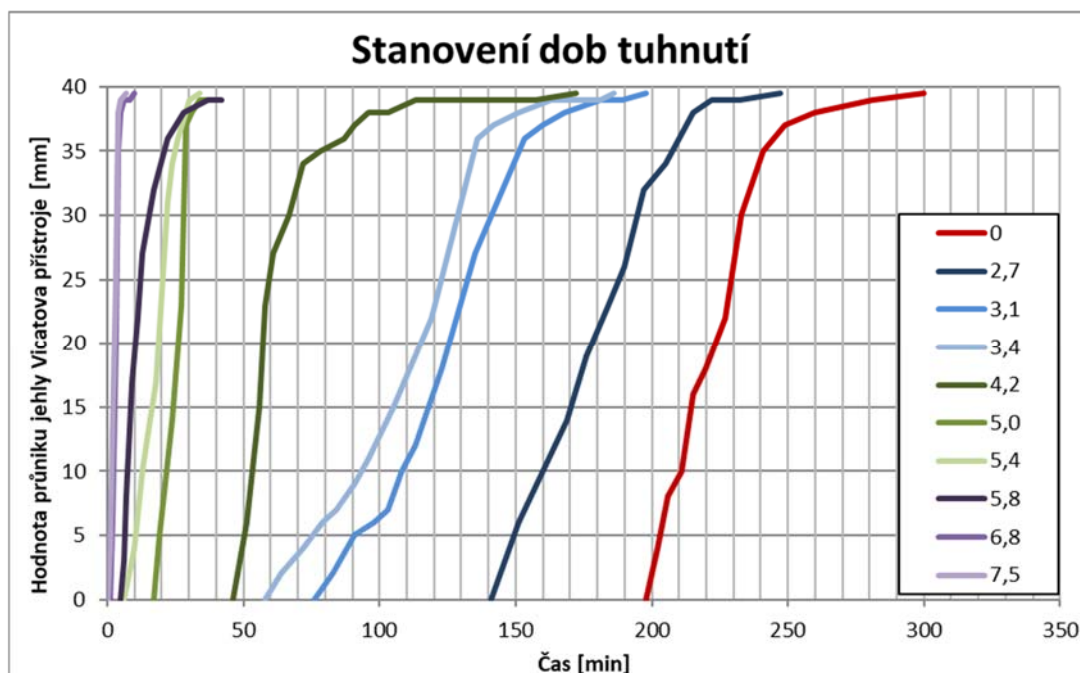
Obrázek 2: Vliv teploty prostředí na závislost nárůstu pevnosti v čase (teplota čerstvého materiálu 20 °C)



Obrázek 3: Vliv teploty prostředí na závislost nárůstu pevnosti v čase (teplota čerstvého materiálu 30 °C)

2.2. Zkouška tuhnutí cementové pasty při různých koncentracích aktivní látky

Pro hlubší pochopení vlivu dávky urychlovače byl proveden samostatný experiment na cementové pastě, ve kterém byla měněna koncentrace aktivní látky urychlovače (tj. poměr aktivní složky vůči dávce cementu). Výstupem této části je stanovení počátku tuhnutí a konce tuhnutí cementové pasty pro různé dávky aktivní látky viz Tabulka 2. Tento experiment poskytuje obecnou informaci o tom, jak změna dávky urychlovače posouvá časové parametry tuhnutí a je využitelný pro návrh regulační logiky (např. jak výrazně upravit dávku, pokud je tuhnutí příliš pomalé/rychlé).



Obrázek 4: Průběh stanovení dob tuhnutí cementové pasty v závislosti na dávce aktivní látky urychlovače tuhnutí k dávce cementu

Tabulka 2: Počátek a konec tuhnutí cementové pasty vzhledem k dávce urychlovače

Aktivní látka urychlovače [% hm. cem.]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]
0,0	200	300
2,7	150	250
3,1	90	200
3,4	75	185
4,2	50	170
5,0	20	45
5,4	10	35
5,8	7	45
6,8	2	10
7,5	1	7

3. KONTROLA ČERSTVÉHO MATERIÁLU 3DPC

V technologii 3D tisku cementových kompozitů je klíčové zajistit, aby čerstvě připravený materiál vykazoval stabilní a reprodukovatelné vlastnosti v celém technologickém řetězci: míchačka → zásobník pumpy → čerpání hadicemi → tisková hlava → extruze tryskou. Materiál musí být současně:

- bezpečně čerpatelný (bez rizika ucpání hadic, přetížení pumpy či nestabilního toku),
- dostatečně tvárný pro homogenní transport a extruzi,
- schopný přijmout urychlovač tuhnutí v tiskové hlavě bez výrazných problémů s promícháním a bez náhlého zatuhnutí v systému.

Z tohoto důvodu byla nastavena metodika vstupní kontroly čerstvého materiálu bezprostředně po ukončení míchání, která slouží jako rychlý a praktický nástroj pro rozhodnutí, zda je materiál vhodný k dalšímu zpracování v rámci 3D tisku.

3.1. Charakter materiálu – tixotropní cementový kompozit

Cementový kompozit, který je předmětem výzkumu vykazuje silně tixotropní chování. To znamená, že jeho reologické vlastnosti se významně mění v čase a jsou závislé na předchozím smykovém zatížení.

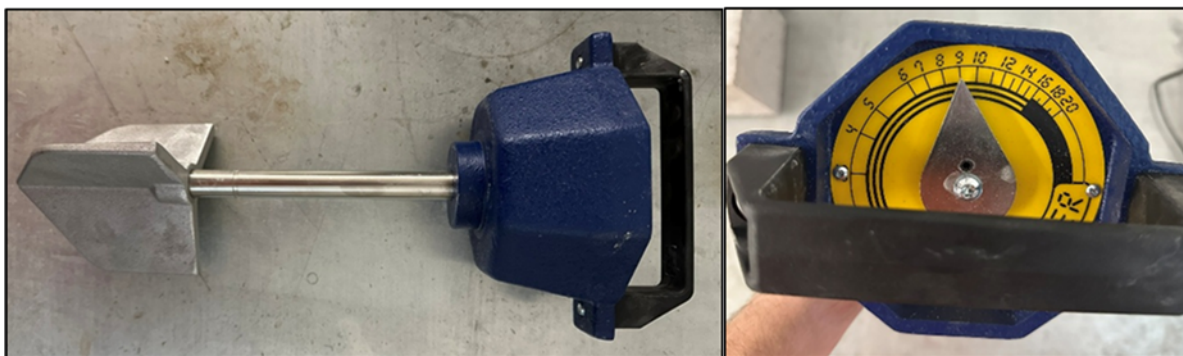
Tixotropie 3DPC je ovlivněna složením směsi, zejména jemnozrnnou frakcí, obsahem pojiva, typem chemických přísad a průběhem hydratace cementu. Časový vývoj tixotropních vlastností je přitom úzce provázán s procesem tuhnutí, což klade vysoké nároky na kontrolu a řízení reologického chování materiálu během 3D tisku.

Po ukončení míchání vykazuje cementový kompozit výrazné tixotropní chování, které je v kontextu 3D tisku cementových směsí považováno za žádoucí. Při čerpání materiálu pumpou a jeho transportu hadicovým vedením je směs vystavena zvýšenému smykovému namáhání, které vede k dočasnému narušení vnitřní struktury a ke snížení efektivní viskozity. V důsledku toho je materiál v průběhu dopravy dostatečně tekutý a stabilně čerpatelný. Po opuštění trysky však dochází k výraznému poklesu smykové rychlosti, což umožňuje rychlou restrukturalizaci systému a obnovení tixotropního zpevnění, projevujícího se nárůstem statické meze toku a zvýšením tuhosti extrudovaného materiálu. Tento mechanismus významně přispívá k tvarové stabilitě uloženého materiálu, omezuje jeho rozlévání a podporuje schopnost vrstvení bez nadměrných deformací.

Z uvedeného vyplývá požadavek, aby vstupní kontrola probíhala co nejdříve po ukončení míchání, protože právě prvotní stav materiálu rozhoduje o úspěšnosti jeho přečerpání a následné zpracovatelnosti.

3.2. Použité měřicí zařízení – Matest Plasticity meter C190

Pro rychlou kontrolu konzistence a časového vývoje zpracovatelnosti byl zvolen přístroj Matest – Plasticity meter C190. Jedná se o ruční laboratorní přístroj určený pro rychlé stanovení plastického chování čerstvých cementových a betonových směsí. Slouží k orientačnímu hodnocení konzistence a plasticity materiálu přímo ve směsi, bez nutnosti složité přípravy vzorků. Princip měření je založen na mechanickém odporu směsi proti smykovému namáhání, které je vyvoláno otáčením třílísté měřicí hlavice ponořené do čerstvého materiálu. Naměřená hodnota odpovídá míře plastického odporu směsi a je citlivá zejména na obsah vody a celkovou zpracovatelnost. Přístroj je kompaktní, přenosný a vhodný pro laboratorní i polní použití. Typické rozměry jsou přibližně 130 × 180 mm a hmotnost kolem 2 kg, což umožňuje snadnou manipulaci a opakované měření. Plasticity Meter C190 se používá zejména pro rychlou kontrolu homogenity a porovnání jednotlivých směsí, přičemž výsledky lze orientačně vztahovat ke klasickým metodám hodnocení konzistence. Přístroj není určen pro detailní reologickou analýzu, ale představuje praktický nástroj pro technologickou kontrolu čerstvých cementových kompozitů. Zařízení poskytuje číselný výstup na stupnici v rozsahu 3 až 20 jednotek, který slouží jako operativní indikátor plasticity materiálu.



Obrázek 5: Plasticity meter Matest C190

Interpretace hodnot je nastavena takto:

- vyšší hodnota na stupnici = materiál je méně viskózní / lépe zpracovatelný,
- nižší hodnota na stupnici = materiál je více viskózní / hůře zpracovatelný.

Je nutné zdůraznit, že výstup plasticity metru nelze přímo převést na absolutní reologické parametry (např. viskozitu v Pa·s nebo mez toku v Pa). Přesto představuje účinný nástroj pro standardizovanou kontrolu a pro statistické porovnávání směsí v čase, což je pro aplikace 3D tisku zásadní.

3.3. Standardizovaný postup měření po ukončení míchání

Z důvodu tixotropního charakteru kompozitu byla definována metodika, která zahrnuje dvě klíčové části:

Okamžité měření po namíchání (kritérium čerpatelnosti)

Bezprostředně po ukončení přípravy čerstvého materiálu v míchačce je provedeno první měření plasticity. Toto měření musí proběhnout co nejdříve, protože i krátká prodleva může vést k nárůstu viskozity a zkreslení vstupního posouzení.

Byl stanoven následující akceptační limit:

- první měření musí být ≥ 16 jednotek.

Pokud je hodnota nižší než 16, materiál je vyhodnocen jako obtížně zpracovatelný z hlediska transportu (míchačka – pumpa – hadice). Takový materiál představuje zvýšené riziko problémů během čerpání, včetně nestabilního průtoku, zvýšeného tlaku v systému nebo potenciálního ucpávání.

Toto kritérium tedy funguje jako rychlá kontrola pro rozhodnutí, zda je možné směs bezpečně nasadit do tiskového procesu. V případě, že směs stanovenému limitu nevyhoví (tj. první měření je < 16), je možné provést korekci její konzistence řízeným přídavkem vody a následným krátkým domícháním, aby bylo dosaženo požadované zpracovatelnosti a čerpatelnosti před přečerpáním do zásobníku pumpy.

Časová série měření (kontrola tixotropního nárůstu)

Druhou částí metodiky je sledování změny plasticity v čase po ukončení míchání. Měření se provádí po 1, 2, 3, 4 a 5 minutách. Cílem je zachytit tixotropní zpevňování směsi, které se projevuje poklesem hodnot plasticity metru v čase. Tato časová série slouží k vytvoření tzv. křivky plasticity v čase, která představuje charakteristickou závislost dané směsi a jejího chování krátce po namíchání. Průběh křivky je významný zejména pro praktickou realizaci 3D tisku, protože v reálném procesu vždy existuje určitá doba mezi ukončením míchání a okamžikem, kdy materiál dorazí do tiskové hlavy.

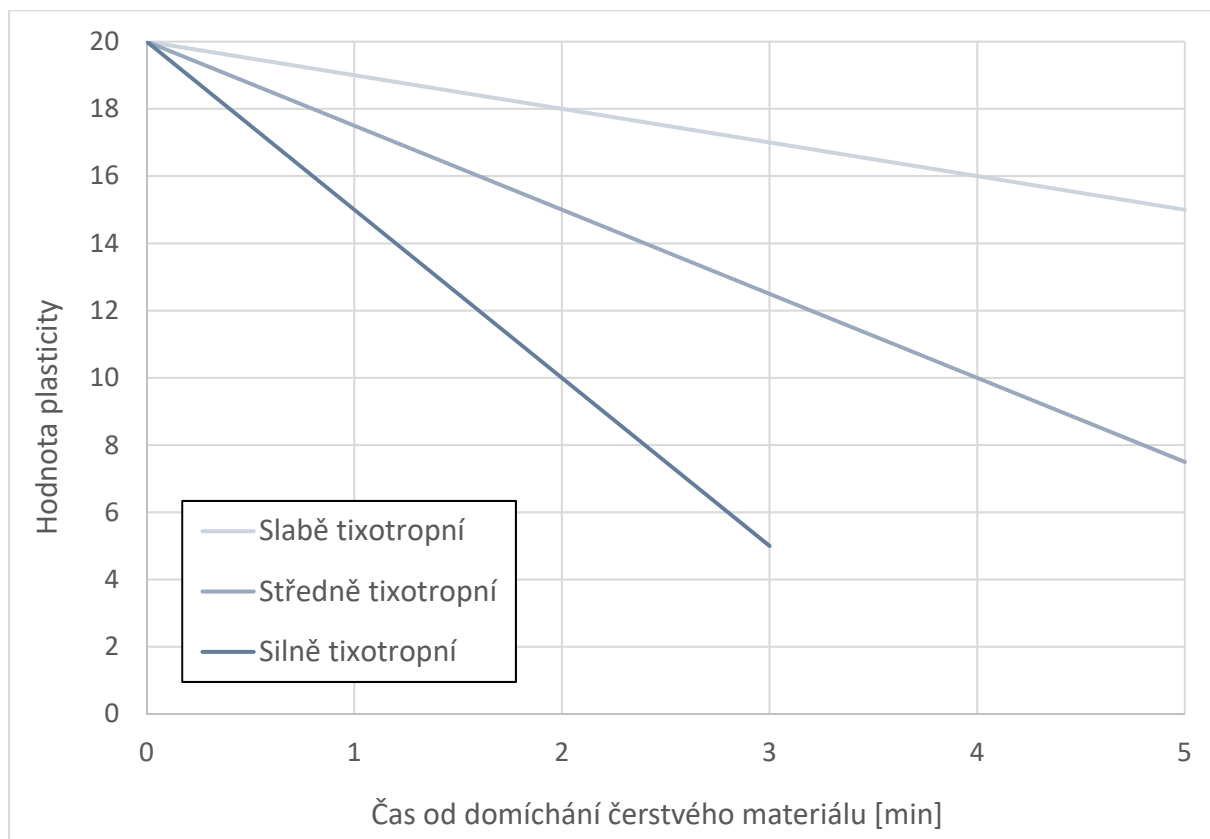
Hodnocení rychlosti tixotropní restrukturalizace (klasifikace průběhu plasticity v čase)

Pro účely operativního hodnocení tixotropního chování čerstvého cementového kompozitu byl zaveden jednoduchý klasifikační systém založený na časovém průběhu hodnot plasticity měřených přístrojem Matest C190 v 0 až 5 minutách po ukončení míchání. Vzhledem k tomu, že výstup plasticity metru nelze přímo převést na absolutní reologické parametry (viskozitu či mez toku), je průběh v čase využíván jako relativní indikátor rychlosti restrukturalizace směsi po ukončení smykového zatížení.

Tixotropie se v této metodice projevuje poklesem naměřené hodnoty plasticity v čase, přičemž rychlost poklesu odpovídá rychlosti nárůstu tuhosti a statické meze toku. Na základě typických trendů byly definovány tři referenční úrovně:

- **Slabě tixotropní směs:** vykazuje pozvolný, téměř lineární pokles hodnot plasticity (např. 20 $\rightarrow$ 15 během 5 minut). Takový průběh odpovídá pomalé restrukturalizaci, která zajišťuje dlouhou dobu zpracovatelnosti, avšak může vést ke snížené tvarové stabilitě extrudovaného materiálu.
- **Středně tixotropní směs:** vykazuje výraznější pokles plasticity v čase (např. 20 $\rightarrow$ 7,5 během 5 minut). Tento průběh představuje kompromis mezi čerpatelností při transportu a rychlým zpevněním po extruzi, což je obecně považováno za výhodné pro stabilní 3D tisk.
- **Silně tixotropní směs:** je charakteristická velmi rychlou restrukturalizací bezprostředně po ukončení míchání, což se projeví prudkým poklesem plasticity již v prvních minutách (např. 20 $\rightarrow$ 5 do 3 minut). Tento typ chování podporuje vysokou tvarovou stabilitu po výtoku z trysky, avšak zvyšuje citlivost procesu na časové prodlevy a může zhoršovat čerpatelnost při přerušení toku nebo při nedostatečném smykovém namáhání.

Takto definované referenční průběhy umožňují rychlé porovnání nové dávky materiálu s očekávaným chováním a slouží jako praktický kontrolní mechanismus pro detekci odchylek způsobených změnami složení, teploty, míchací energie nebo variability vstupních surovin.



Obrázek 6: Charakteristiky tixotropního chování

Charakterizace rychlosti nárůstu tixotropie pomocí průběhu plasticity v čase

Rychlost nárůstu tixotropie čerstvého cementového kompozitu je v této metodice hodnocena na základě časového vývoje hodnot plasticity měřených přístrojem Matest C190 v čase 0 až 5 minut po ukončení domíchání. Vzhledem k tomu, že plasticity meter neposkytuje přímý výstup v absolutních reologických jednotkách, je průběh hodnot v čase využíván jako relativní indikátor restrukturalizace směsi po poklesu smykového zatížení.

Tixotropní nárůst se projevuje poklesem naměřené hodnoty plasticity v čase, přičemž strmější pokles odpovídá rychlejšímu obnovení vnitřní struktury směsi, a tedy rychlejšímu nárůstu tuhosti a statické meze toku. Pro účely rychlé interpretace naměřených dat byly definovány tři typické režimy rychlosti restrukturalizace, které reprezentují charakteristické tvary křivek plasticity v čase:

Konstantní průběh:

Konstantní režim je charakteristický plynulým a přibližně rovnoměrným poklesem hodnot plasticity v čase. Změna konzistence probíhá stabilním tempem bez výrazného zrychlení nebo zpomalení restrukturalizace. Tento typ průběhu je výhodný z hlediska predikovatelnosti materiálu během technologického procesu, protože směs nevykazuje prudké změny vlastností v krátkém časovém intervalu.

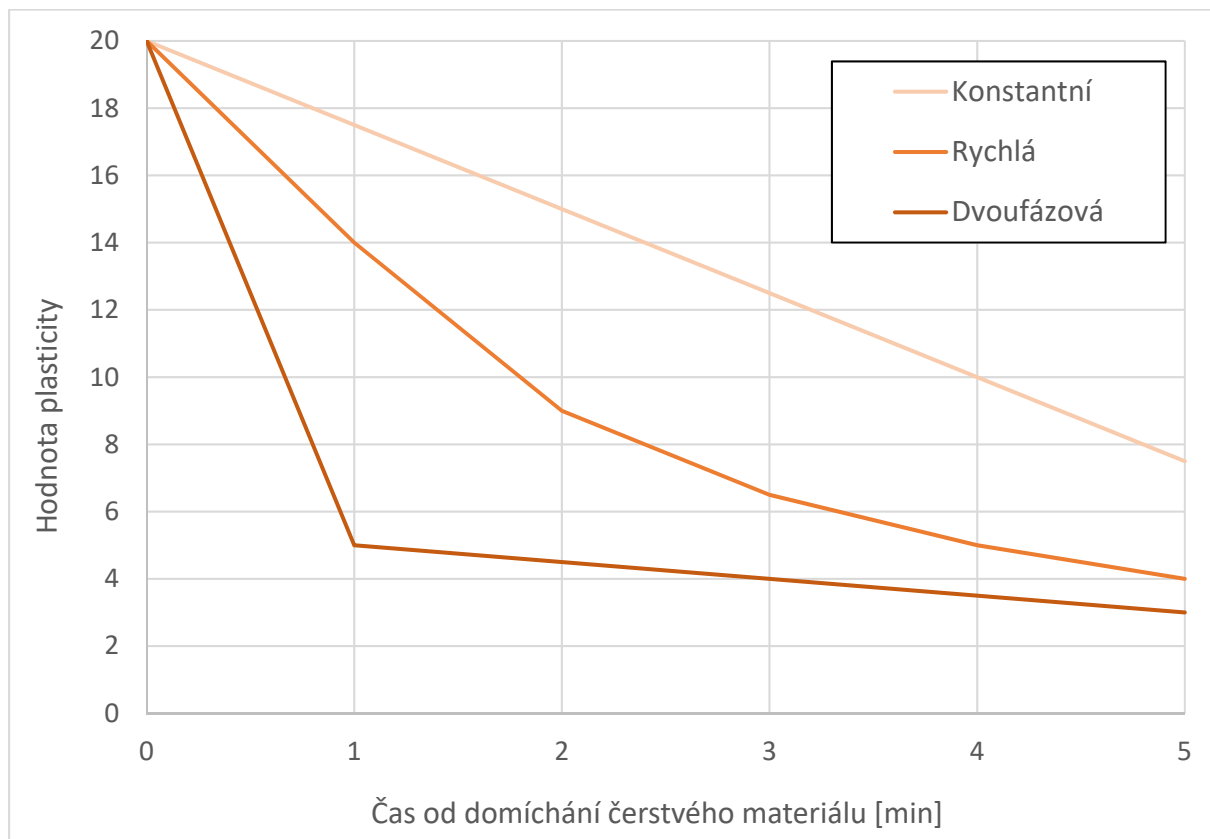
Rychlý průběh:

Rychlý režim odpovídá směsi, u které dochází k výraznému poklesu plasticity již v prvních minutách po ukončení domíchání. Materiál tedy restrukturalizuje rychleji a v krátkém čase získává vyšší tuhost. Tento průběh je obecně výhodný pro stabilitu tvaru po extruzi a omezení rozlévání uloženého materiálu, avšak zvyšuje citlivost procesu na časové prodlevy a na přerušení toku, protože směs může rychle ztrácet zpracovatelnost v klidových podmínkách.

Dvoufázový průběh:

Dvoufázový režim je charakterizován prudkým poklesem hodnot plasticity bezprostředně po ukončení domíchání, po kterém následuje výrazné zpomalení dalšího poklesu. Tento průběh odpovídá situaci, kdy směs velmi rychle obnoví vnitřní strukturu (rychlá primární restrukturalizace), a následně již dochází pouze k pozvolnému doběhu změn. Z technologického hlediska se jedná o chování, které může být výhodné pro okamžitou tvarovou stabilitu extrudovaného materiálu, avšak může být kritické z hlediska manipulace se směsí po ukončení míchání, protože i krátké zpoždění může významně ovlivnit čerpatelnost.

Definované režimy rychlosti nárůstu tixotropie slouží jako referenční rámec pro porovnávání jednotlivých dávek směsi a umožňují rychle identifikovat odchylky v restrukturalizačním chování. Tyto odchylky mohou být způsobeny například změnami ve složení směsi, variabilitou vstupních materiálů, rozdílnou intenzitou míchání, teplotními podmínkami nebo odlišným dávkováním přísad.



Obrázek 7: Příklad rychlosti restrukturalizace materiálu danou tixotropií

3.4. Vyhodnocení a význam statistického přístupu

Jednotlivá měření plasticity metrem nelze použít pro výpočet reologických parametrů v absolutních jednotkách. Metodika je však navržena jako kontrolní mechanismus založený na statistickém porovnávání.

Opakovaným měřením více dávek lze:

- 1) nashromáždit datový soubor plasticity v čase,
- 2) určit průměrný průběh křivky (referenční chování směsi),
- 3) definovat přijatelné rozmezí odchylek.

Nově připravené směsi lze následně porovnávat s referenční křivkou a vyhodnocovat, zda:

- materiál vykazuje shodnou počáteční zpracovatelnost,
- jeho tixotropní nárůst probíhá standardním tempem,
- nedochází k nežádoucím změnám (např. rychlejší tuhnutí, vyšší počáteční viskozita, nestabilní vývoj).

Takový přístup umožňuje dlouhodobě kontrolovat konzistenci výroby čerstvého materiálu a včas detekovat změny způsobené například:

- variabilitou vstupních surovin,
- odchylkami v dávkování vody či přísad,
- změnou doby/intenzity míchání,
- změnou teplotních podmínek,
- stárnutím nebo odlišnou šarží cementu či plniv.

Průběh změny plasticity čerstvého materiálu v čase (referenční křivka)

Na Obrázku 8 je znázorněn průběh změny plasticity čerstvého cementového kompozitu v čase od ukončení domíchání, stanovený pomocí zařízení Plasticity meter Matest C190. Měření byla prováděna za stabilních laboratorních podmínek, kdy teplota prostředí i teplota čerstvého materiálu dosahovala 20 ± 1 °C (relativní vlhkost vzduchu přibližně 50 %). Z důvodu výrazného tixotropního charakteru směsi bylo měření zahájeno bezprostředně po ukončení míchání (čas 0) a následně opakováno po 1, 2, 3, 4 a 5 minutách.

Graf zahrnuje tři charakteristické křivky: průměrnou hodnotu naměřenou ze souboru opakovaných měření a dále obálku vymezenou maximálními a minimálními naměřenými hodnotami v jednotlivých časových okamžicích. Zobrazení těchto mezních hodnot umožňuje posoudit rozptyl výsledků a tím i míru variability materiálu při opakované přípravě. Z grafu je patrné, že průměrná hodnota plasticity v čase klesá, což odpovídá postupné restrukturalizaci směsi po ukončení smykového zatížení a nárůstu tuhosti materiálu. Tento trend je typický pro tixotropní cementové systémy, kdy po ukončení míchání dochází k obnovování vnitřní struktury a ke zvyšování statické meze toku.

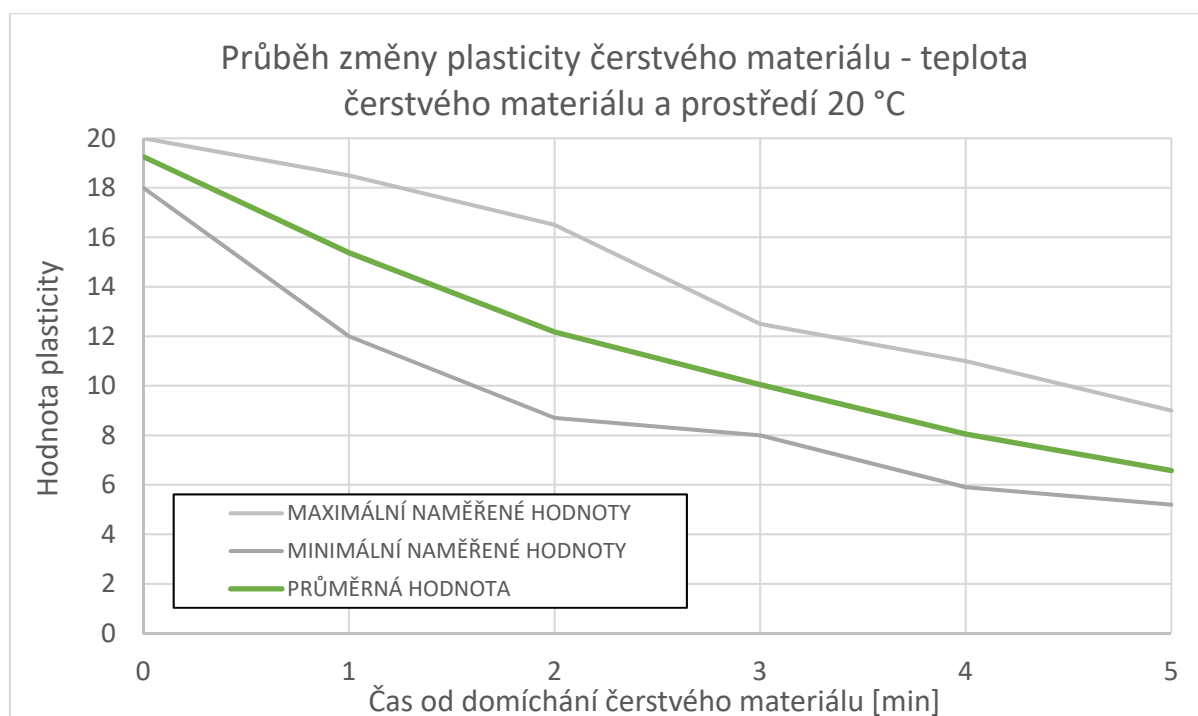
Průměrná křivka zároveň slouží jako referenční průběh pro vstupní kontrolu čerstvého materiálu. V případě nově připravené dávky lze porovnat její naměřené hodnoty s průměrnou křivkou a obálkou minimálních a maximálních hodnot a vyhodnotit, zda se směr chová standardně, nebo vykazuje odchylky, které mohou ovlivnit čerpatelnost a následnou extruzi.

Z hlediska intenzity tixotropního chování lze průběh křivky interpretovat také v kontextu dříve definovaných kategorií slabě / středně / silně tixotropní směsi. Pokles plasticity v řádu jednotek během prvních minut po domíchání ukazuje na významnou schopnost směsi rychle zvyšovat tuhost v klidu, což je z hlediska 3D tisku žádoucí pro tvarovou stabilitu extrudovaného

materiálu. Současně však tento průběh zdůrazňuje nutnost dodržení časové kázně při manipulaci s materiálem mezi míchačkou, zásobníkem pumpy a tiskovou hlavou.

Křivku lze dále charakterizovat z hlediska rychlosti restrukturalizace podle režimů definovaných v kapitole 4.4 (konstantní, rychlá, dvoufázová). V tomto případě vykazuje průměrná křivka převážně plynulý pokles hodnot plasticity, což odpovídá restrukturalizaci probíhající kontinuálně v čase. Přítomnost obálky minimálních a maximálních hodnot zároveň ukazuje, že u některých dávek může být restrukturalizace výrazně rychlejší nebo pomalejší, což se projeví strmějším nebo naopak pozvolnějším průběhem křivky.

Výsledný graf tedy představuje praktický nástroj pro kontrolu konzistence materiálu v čase a současně umožňuje kvalifikované posouzení, zda se aktuální dávka směsi nachází v očekávaném rozsahu tixotropního chování a restrukturalizační dynamiky, které jsou nezbytné pro stabilní čerpání, řízenou extruzi a dostatečnou tvarovou stabilitu tištěných vrstev.



Obrázek 8: Časový průběh plasticity čerstvého materiálu

Vazba na dávkování urychlovače v tiskové hlavě

V technologii 3D tisku je urychlovač tuhnutí přidáván až v tiskové hlavě, kde musí dojít k jeho rychlému a homogennímu promíchání s čerstvým materiálem. Pokud je základní směs již při vstupní kontrole příliš viskózní (nízká plasticita), dochází ke zvýšení rizika:

- nedokonalého promíchání urychlovače,
- nestability extruze,
- zhoršení kvality tištěných vrstev.

Proto vstupní kontrola plasticity slouží nejen pro posouzení čerpatelnosti, ale i jako indikátor, zda bude možné v tiskové hlavě bezpečně a rovnoměrně aktivovat tuhnutí.

Metodika je vhodná pro praktické nasazení v laboratorním i poloprovozním měřítku a poskytuje standardizovaný rámec pro kontrolu stability směsi v čase, což je pro spolehlivý 3D tisk cementových kompozitů klíčové.

4. METODY KONTROLY TUHNUTÍ A JEJICH POROVNÁNÍ

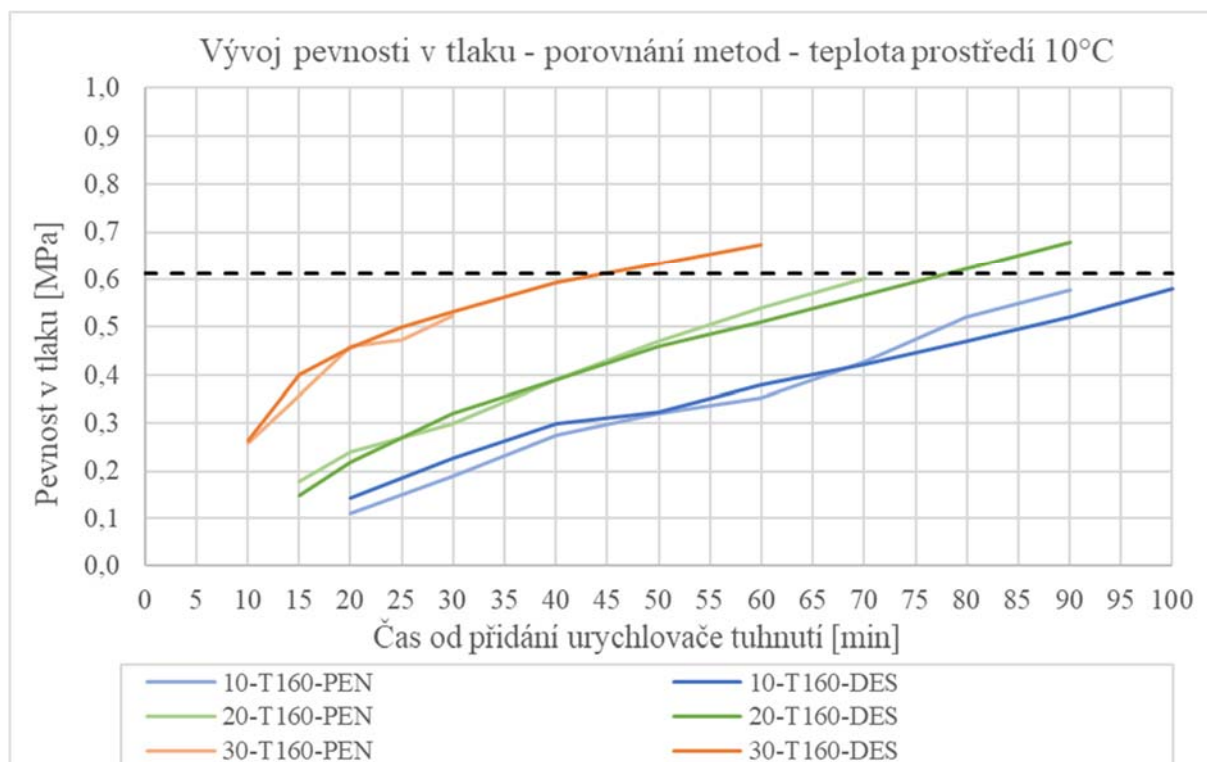
4.1. Ruční penetrometr jako metoda pro in situ stanovení green strength

Pro kombinace 3×3 (viz experiment 3.1) byla provedena měření ručním penetrem. Naměřené hodnoty odporu penetrometru byly přepočteny na ekvivalentní pevnost v tlaku a porovnány s výsledky pevnosti v tlaku stanovenými destruktivně na trámečcích 40×40×160 mm dle ČSN EN 196-1. Bylo zjištěno, že výsledky obou metod se liší pouze v rámci nejistoty měření. Lze tedy konstatovat, že ruční penetrometr je dostatečně přesná a vhodná metoda pro operativní hodnocení green strength in situ, a tedy i pro praktické řízení procesu tuhnutí během 3D tisku.

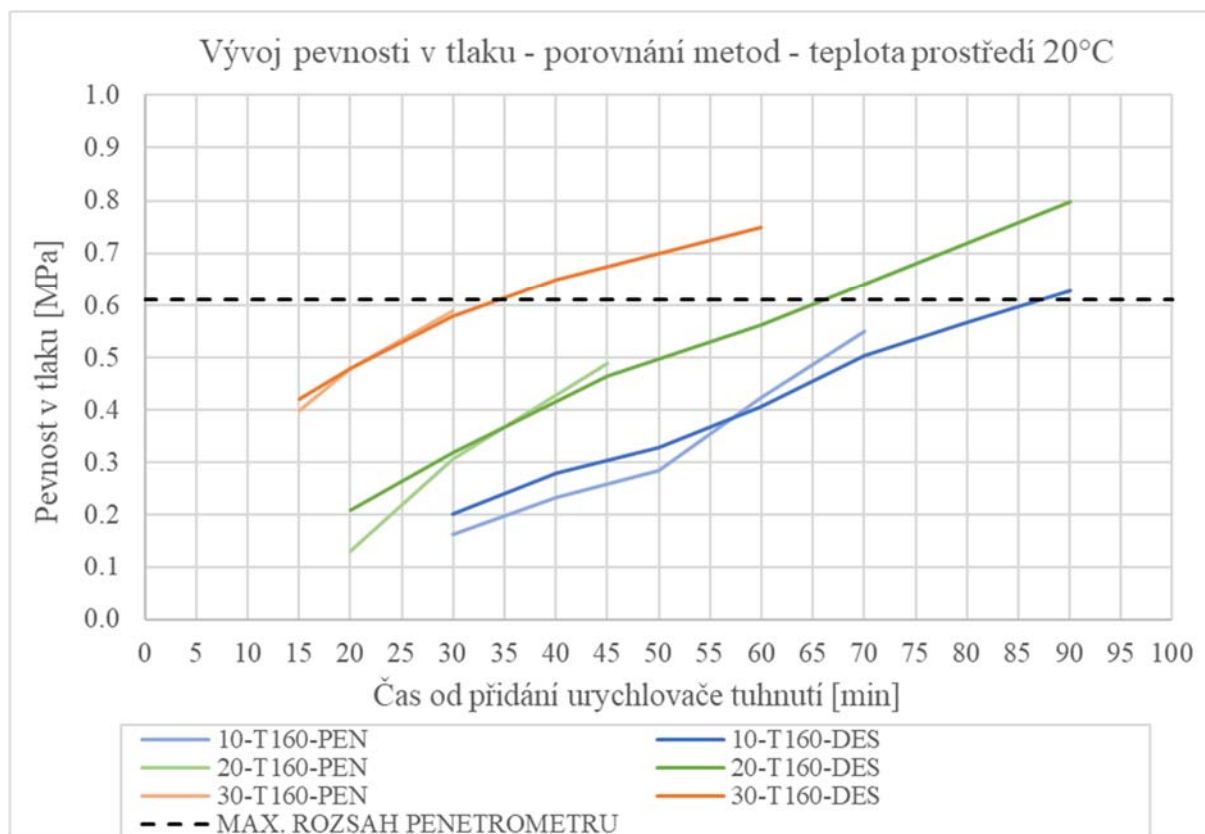


Obrázek 9: Metody stanovení pevnosti v tlaku (vlevo penetrometr, vpravo destruktivně)

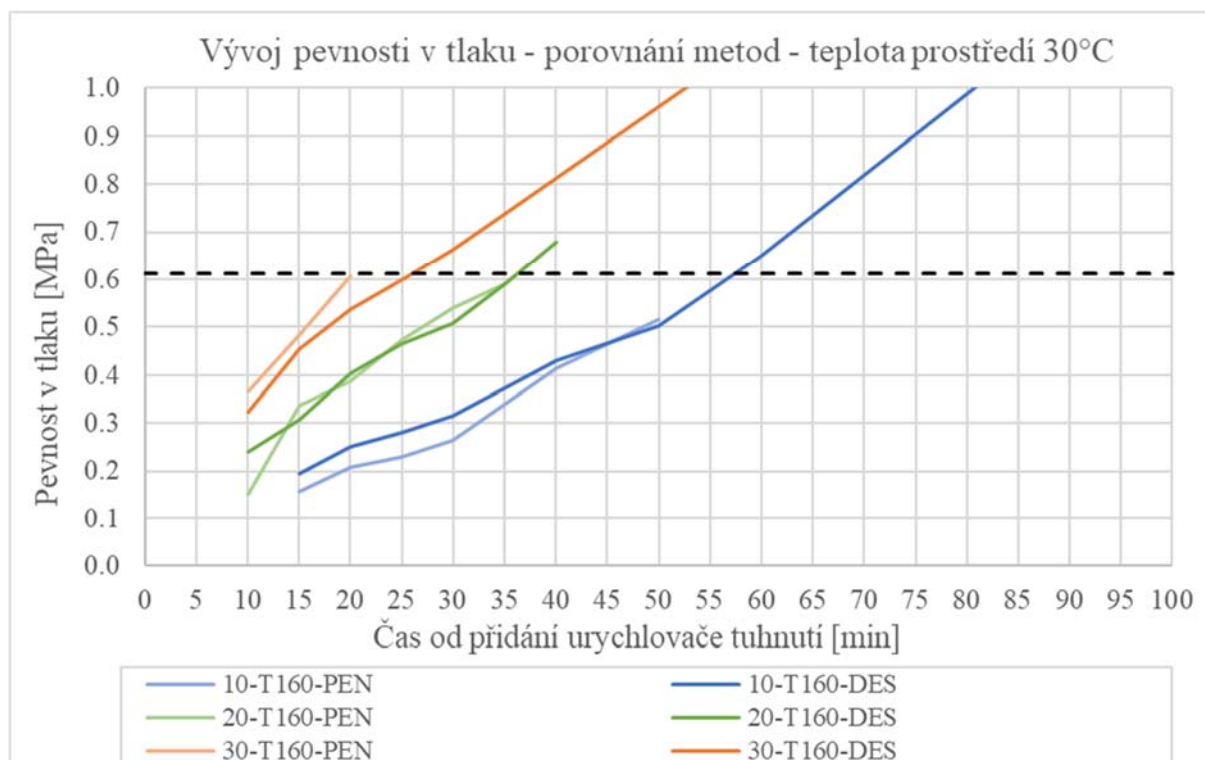
Grafy na obrázku 9 až 12 uvádějí grafické porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku pro prostředí o teplotě 10, 20 a 30 °C. Maximální rozsah penetrometru je cca 0,6 MPa. Tato limitní hodnota je v grafech vyznačena černou čárkovanou čarou. Hodnoty pevnosti v tlaku získané destruktivní metodou jsou označeny koncovkou „DES“, hodnoty pevnosti v tlaku stanovené penetrem jsou označeny koncovkou „PEN“.



Obrázek 10: Porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku – teplota prostředí 10 °C



Obrázek 11: Porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku – teplota prostředí 20 °C



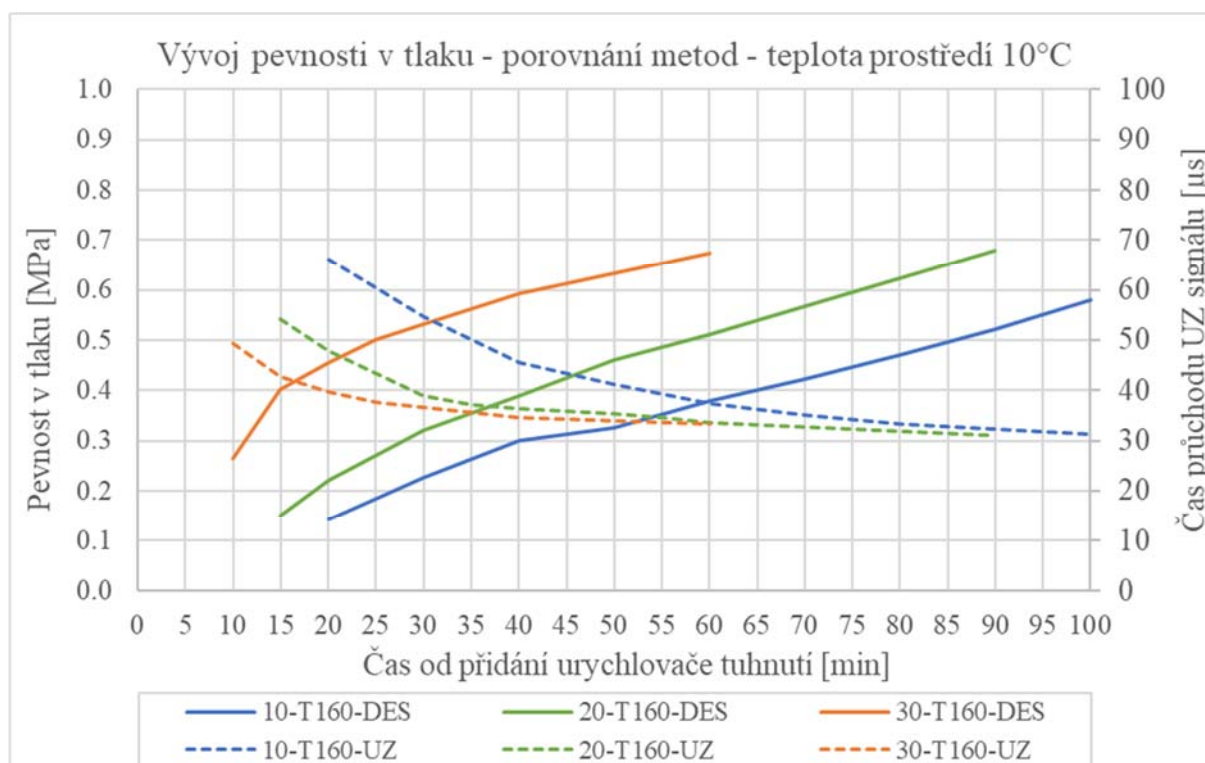
Obrázek 12: Porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku – teplota prostředí 30 °C

4.2. Ultrazvuková metoda a její omezení

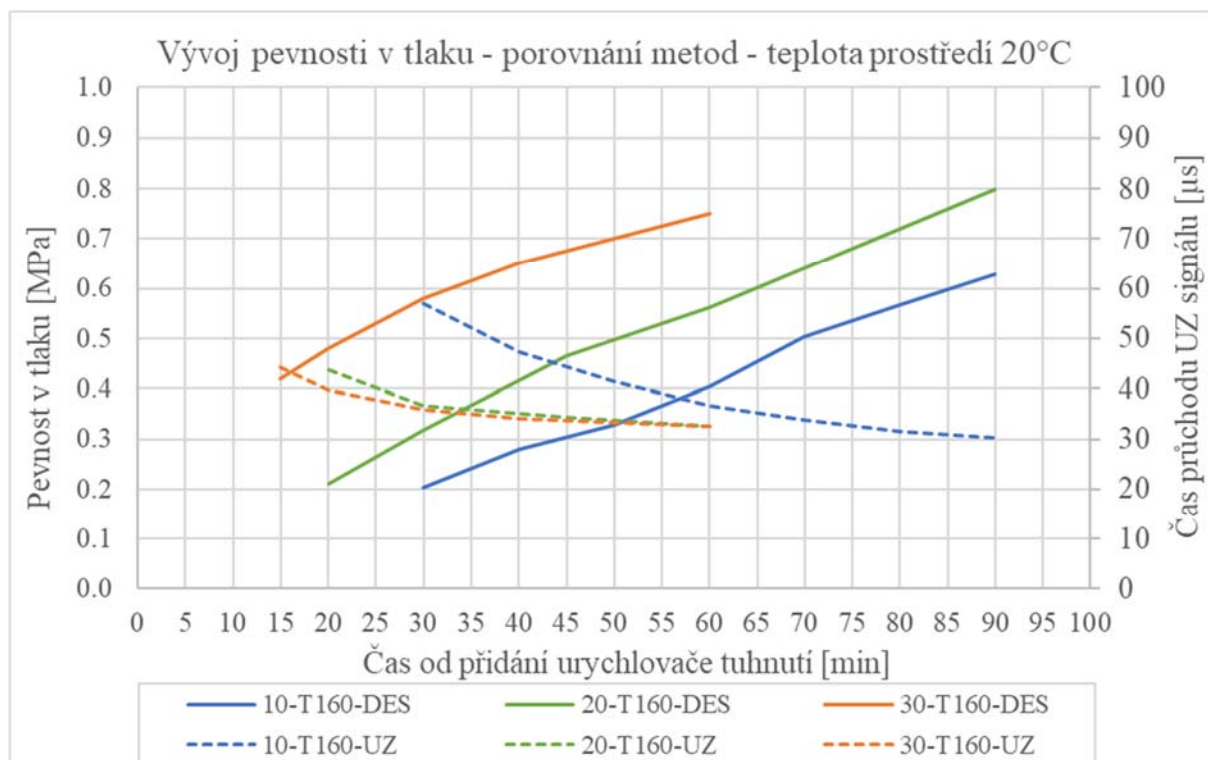
Pro kombinace 3×3 byla dále provedena zkouška stanovení rychlosti průchodu ultrazvukového signálu viz Obrázek 13. Ukázalo se však, že změna rychlosti průchodu UZ signálu v čase nemá lineární charakter, zatímco nárůst pevnosti v tlaku v časovém intervalu 10 až 90 minut po aktivaci urychlovačem vykazuje převážně lineární průběh. Z tohoto důvodu je UZ metoda méně vhodná pro jednoduché operativní řízení v krátkých časech, protože vyžaduje složitější převodní vztahy a interpretaci.



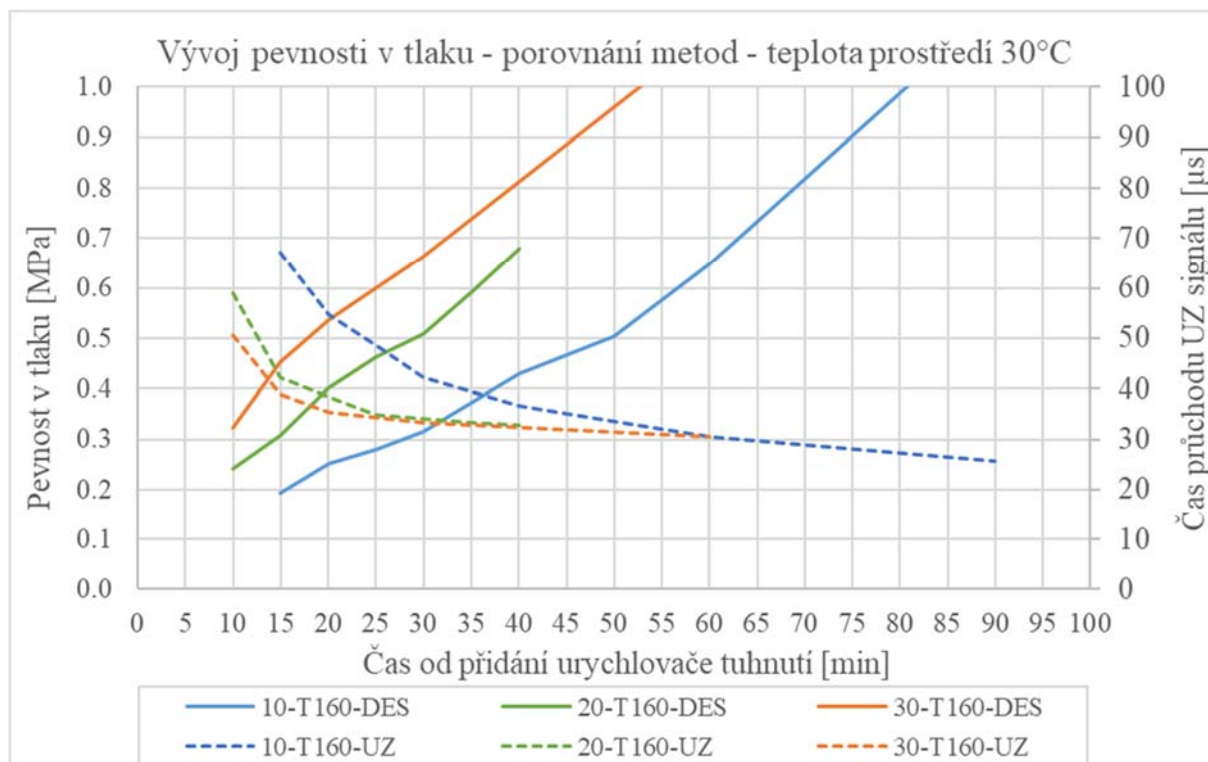
Obrázek 13: Stanovení rychlosti průchodu ultrazvukového signálu



Obrázek 14: Porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku – teplota prostředí 10 °C



Obrázek 15: Porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku – teplota prostředí 20 °C



Obrázek 16: Porovnání metod stanovení pevnosti v tlaku – teplota prostředí 30 °C

Přesto byl pro kombinaci 20 °C směsi tuhnoucí ve 20 °C stanoven vztah mezi časem průchodu UZ signálu a pevností v tlaku pro stáří materiálu od 10 minut až do 24 hodin. Tento vztah může být využit zejména pro případné budoucí automatizované vyhodnocování (např. pokud by byl UZ senzor integrován do výrobního systému).

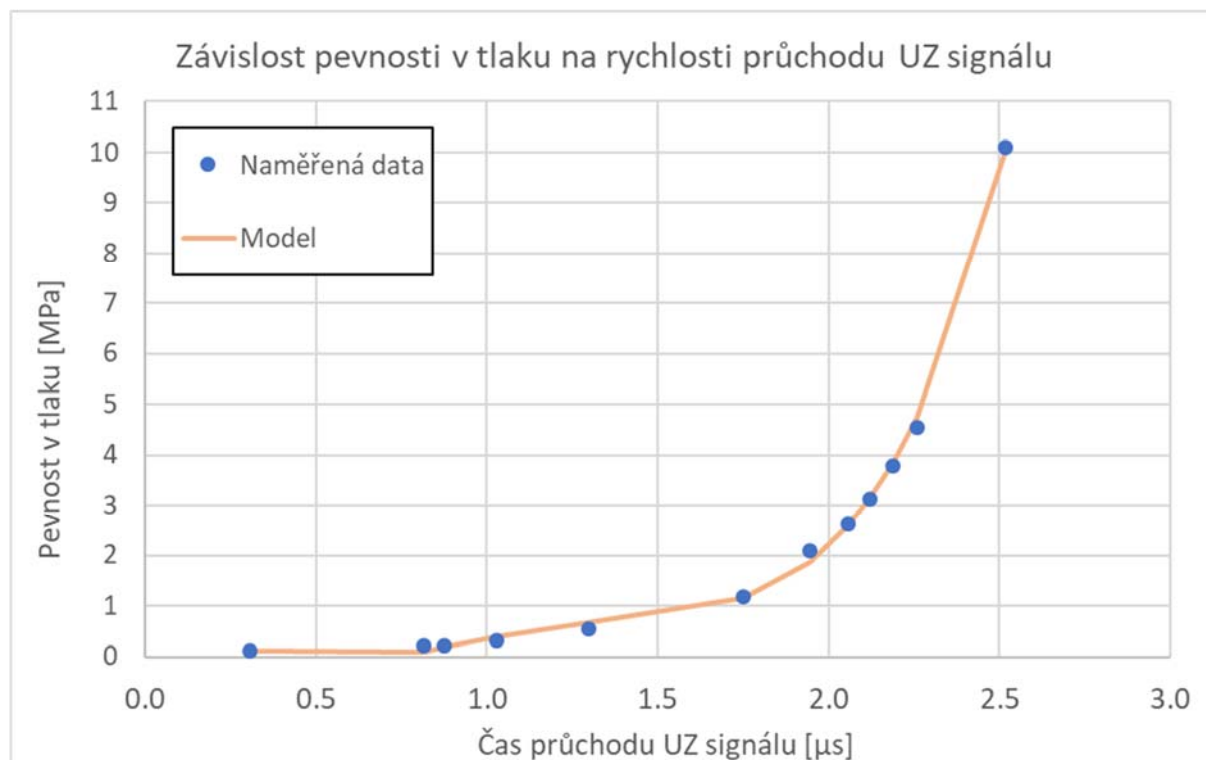
Byl stanoven následující vztah daný rovnicí (1) polynomu 4. stupně:

$$\sigma_c(v) = 2,701486 \cdot v^4 - 12,175218 \cdot v^3 + 19,491908 \cdot v^2 - 11,943753 \cdot v + 2,287249, \quad (1)$$

kde $\sigma_c(v)$ je pevnost v tlaku v MPa,

v je rychlost průchodu UZ signálu v $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Koeficient determinace $R^2 = 0,99842$.



Obrázek 17: Porovnání naměřených hodnot s hodnotami danými předloženým modelem (1)

Tabulka 3: Porovnání pevnosti v tlaku (skutečnost vs. model)

Stáří [min]	10	15	20	30	60	120	180	240	300	360	480	1440
Rychlost UZ signálu [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,31	0,81	0,88	1,03	1,30	1,75	1,94	2,06	2,12	2,19	2,26	2,52
Pevnost v tlaku [MPa]	0,11	0,21	0,21	0,32	0,54	1,19	2,10	2,63	3,13	3,80	4,55	10,1
Pevnost v tlaku (model (1)) [MPa]	0,13	0,10	0,19	0,40	0,67	1,17	1,87	2,61	3,14	3,85	4,76	10,0

5. MODEL PREDIKCE ČASU K DOSAŽENÍ LIMITNÍ PEVNOSTI 0,2 MPa

Na základě dat z experimentu 3×3 (standardní koncentrace urychlovače 5% hm. k dávce cementu) byl vytvořen model, jehož vstupy jsou:

- teplota prostředí v intervalu 10 až 30 °C,
- teplota čerstvého materiálu před smícháním s urychlovačem v intervalu 10 až 30 °C.

Výstupem modelu je čas potřebný k dosažení pevnosti v tlaku 0,2 MPa.

Hodnota 0,2 MPa byla zvolena jako limitní, protože odpovídá pevnosti, kterou lze spolehlivě stanovit jak ručním penetrem, tak destruktivně dle ČSN EN 196-1, a současně jde o prakticky významnou úroveň počáteční únosnosti materiálu pro 3D tisk. Model umožňuje rychle vyhodnotit, zda při daných podmínkách bude tuhnutí příliš rychlé nebo příliš pomalé, a poskytuje podklad pro korekční zásahy.

Tabulka 4: Vstupní hodnoty pro předpovědní model

Prostředí tuhnutí [°C]	Výchozí teplota čerstvého materiálu před smícháním s urychlovačem [°C]	Čas od přidání urychlovače do dosažení pevnosti v tlaku 0,2 MPa [min]
10	10	27
	20	18
	30	8
20	10	30
	20	19
	30	7
30	10	16
	20	8
	30	6

Na základě hodnot uvedených v tabulce 4 byla vytvořena následující rovnice (2):

$$t = 15 + \frac{11}{4}TP - \frac{11}{10}TM - \frac{3}{40}TP^2 + \frac{3}{100}TM^2 + \frac{1}{16}TP \cdot TM - \frac{11}{4000}TP^2 \cdot TM - \frac{21}{4000}TP \cdot TM^2 + \frac{7}{40000}TP^2 \cdot TM^2, \quad (2)$$

kde t je čas od extruze po dosažení pevnosti v tlaku 0,2 MPa v minutách,

TP je teplota prostředí v °C,

TM je teplota čerstvého materiálu před smícháním s urychlovačem tuhnutí v °C.

Ukázka výpočtu času pro dosažení pevnosti v tlaku 0,2 MPa pro teplotu prostředí 13,2 °C a teplotu čerstvého materiálu 16,8 °C je znázorněna v Tabulce 5:

Tabulka 5: Výpočet času k dosažení pevnosti 0,2 MPa pro konkrétní zadané parametry

Předpovědní model (2)		
Teplota prostředí:	13,2	°C
Teplota před urychlovačem:	16,8	°C
Čas k dosažení 0,2 MPa :	23	min

6. SYSTÉM MÍCHÁNÍ URYCHLOVAČE A VODY PRO DOSAŽENÍ POŽADOVANÉ KONCENTRACE AKTIVNÍ LÁTKY

Na základě naměřených hodnot pevnosti v konkrétních časech po extruzi lze provést korekce technologických parametrů. Typicky se jedná o:

- zvýšení dávky urychlovače, pokud je nárůst pevnosti příliš pomalý,
- snížení dávky urychlovače, pokud je tuhnutí příliš rychlé (riziko ucpávání, ztráty zpracovatelnosti),
- úpravu teploty čerstvého materiálu před aktivací, např. temperováním, pokud je potřeba posunout rychlost tuhnutí bez výrazného zásahu do chemické dávky urychlovače.

Vedle toho lze z aktuální teploty prostředí odhadnout očekávanou rychlost tuhnutí extrudovaného materiálu i bez okamžitého měření, což umožňuje preventivní nastavení dávkování ještě před zahájením tisku.

Za účelem optimalizace řízení tuhnutí byl navržen systém, který umožňuje z jednoho koncentrovaného roztoku urychlovače (vodný roztok síranu hlinitého s vysokou koncentrací aktivní látky) připravovat finální urychlovač o požadované koncentraci smícháním s vodou.

6.1. Vstupy systému (parametry na ovládacím panelu)

Vstupní parametry softwaru jsou:

- hustota vody dle její teploty [kg/m^3],
- hustota základního urychlovače s vysokou koncentrací [kg/m^3],
- hmotnostní podíl účinné látky v základním urychlovači [% hm.],
- množství cementu v tisknutém kompozitu [kg/m^3],
- rychlost extruze [l/min].

Operátor dále zadává dva klíčové regulační vstupy:

- dávkování finálního urychlovače [ml/min],
- požadovanou koncentraci urychlovače vzhledem k dávce cementu [% hm. na cement].

6.2. Výstupy systému

Na základě zadaných hodnot systém vypočítá požadované průtoky:

- základního urychlovače s vysokou koncentrací účinné látky [ml/min],
- vody [ml/min],

tak, aby výsledná směs (finální urychlovač) splnila požadovanou koncentraci aktivní látky vůči cementu při dané rychlosti extruze.

6.3. Kontrola skutečného dávkování

Součástí je také kontrolní režim, kdy operátor zadá skutečné hodnoty spotřeby základního urychlovače a vody [ml/min]. Software následně vypočte:

- skutečný celkový průtok finálního urychlovače,
- skutečný poměr aktivní složky urychlovače k dávce cementu,

což umožňuje rychle odhalit odchylky (např. chyby čerpadel, viskozitní změny, nepřesnosti dávkování) a provést korekce.

Ukázka zadávání vstupních hodnot a výstupu v podobě nastavení poměru dávkování urychlovače a vody pro dosažení vhodného poměru aktivní složky urychlovače k cementu je na Obrázku 18. Též je zde uvedena kontrola skutečného dávkování.

VSTUPY – MATERIÁLY		
Voda	998	kg/m ³
Urychlovač ORIG	1300	kg/m ³
Aktivní složka urychlovač ORIG	37,5	%
Množství cementu	360	kg/m ³
Rychlost extruze	1	l/min

VSTUPY – URYCHLENÍ TUHNUTÍ		
Dávkování urychlovače	70	ml/min
Požadovaný poměr urychlovače k cementu	5,5	% hm. na cem.

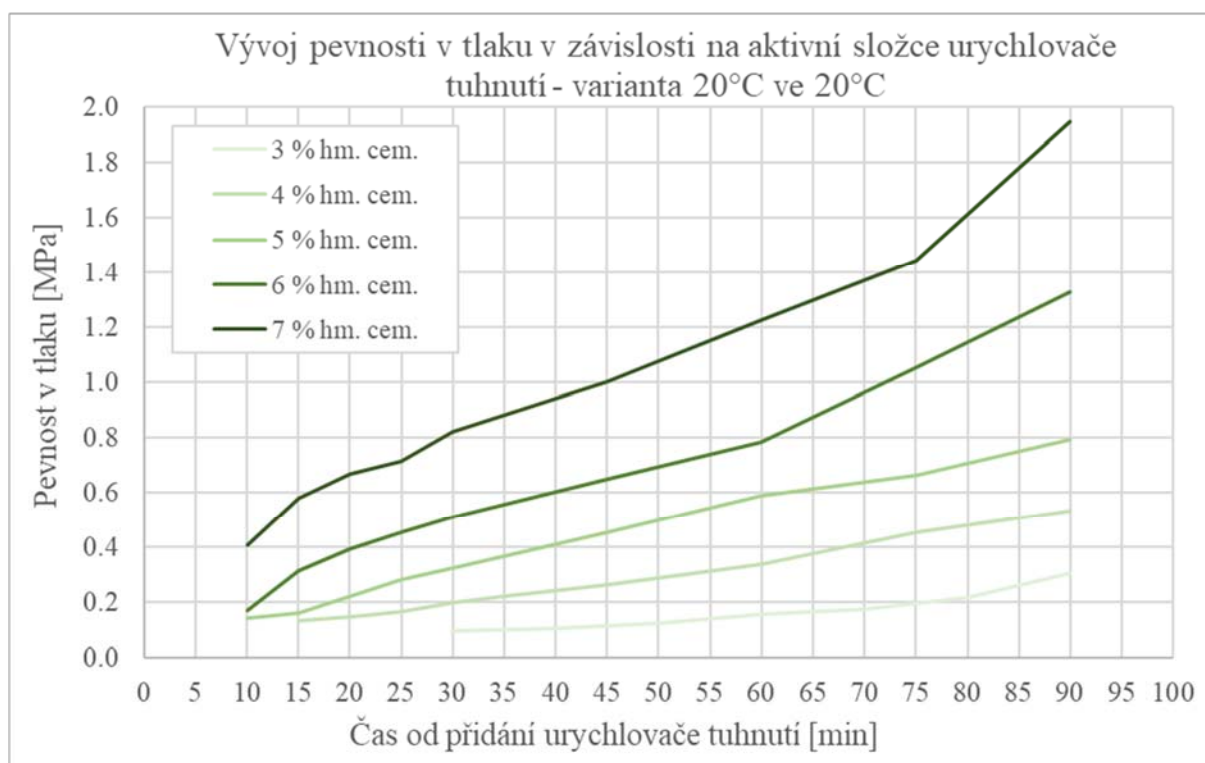
VÝSTUPY – NASTAVENÍ DÁVKOVÁNÍ		
Dávka urychlovač ORIG	40,6	ml/min
Dávka vody	29,4	ml/min

KONTROLA – SKUTEČNÉ DÁVKOVÁNÍ		
Dávka urychlovač ORIG	39,8	ml/min
Dávka vody	28,1	ml/min
Skutečný hmotnostní podíl aktivní látky	5,4	%
Celkový průtok	67,9	ml/min

Obrázek 18: Nastavení dávkování urychlovače tuhnutí

6.4. Ověření vývoje pevnosti v tlaku

Pro referenční podmínky 20 °C prostředí i 20 °C čerstvého materiálu byl proveden detailní experiment, ve kterém byla měněna dávka urychlovače (hmotnostní zastoupení aktivní látky). U každé varianty byl sledován vývoj pevnosti v čase do 90 minut. Tento dataset je zásadní pro přímé porovnání rychlosti nárůstu pevnosti při různých dávkách urychlovače, nastavení korekcí dávkování urychlovače při stabilních teplotních podmínkách a doplnění modelu o možnost korekce dávky (přestože základní model byl vytvořen pro standardní koncentraci). Na Obrázku 19 je znázorněn graf vývoje pevnosti v tlaku v čase na základě dávky aktivní složky urychlovače tuhnutí vztažené k dávce cementu.



Obrázek 19: Vývoj pevnosti v tlaku v čase vzhledem k účinné dávce urychlovače tuhnutí vztažené k dávce cementu

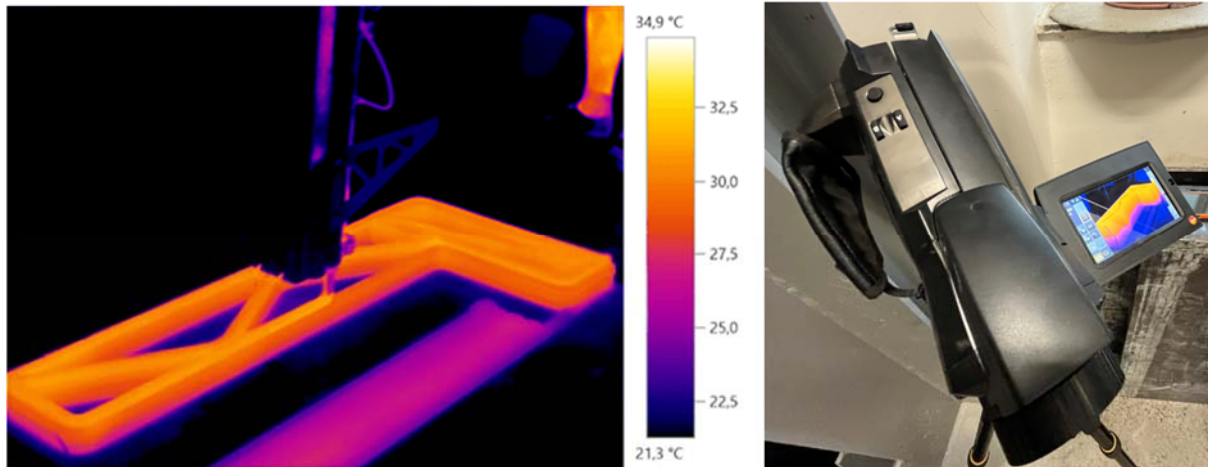
7. KONTROLA PROCESU ZRÁNÍ MATERIÁLU BĚHEM TISKU

Využití termokamery při vyhodnocování zrání struktury 3D tištěné cementové konstrukce představuje účinný nástroj pro identifikaci prostorových nehomogenit hydratačního procesu. Termokamera umožňuje bezkontaktní a plošné sledování povrchové teploty konstrukce v čase, přičemž teplotní pole přímo odráží intenzitu probíhajících hydratačních reakcí a podmínky odvodu tepla. Lokální odchylky teploty mohou indikovat rozdíly ve složení směsi, nepravidelnosti v ukládání jednotlivých stop, změny časových odstupů mezi vrstvami nebo lokální vliv okolního prostředí. Analýza termogramů tak umožňuje včasné odhalení oblastí s nerovnoměrným zráním, které mohou vést ke snížené pevnosti nebo poruchám mezivrstevového spojení. Termokamera byla využita jako diagnostický prostředek pro hodnocení kvality a homogenity 3D tištěné konstrukce bez nutnosti destruktivních zásahů.

Pro zpětnou vazbu tisku a monitoringu bylo zkoumáno a využíváno několik metod s vazbou na sledování teploty jak konstrukce během tisku tak samotné parametry směsi. Teplota je nosným faktorem pro sledování vývoje hydratace cementu ve směsi. Všechny tyto zkoušky byly vzájemně korelovány a srovnávány tak, aby bylo možné celý proces zjednodušit a navázat na online úpravu řízení 3D tisku.

7.1. Monitoring teploty pomocí termokamery

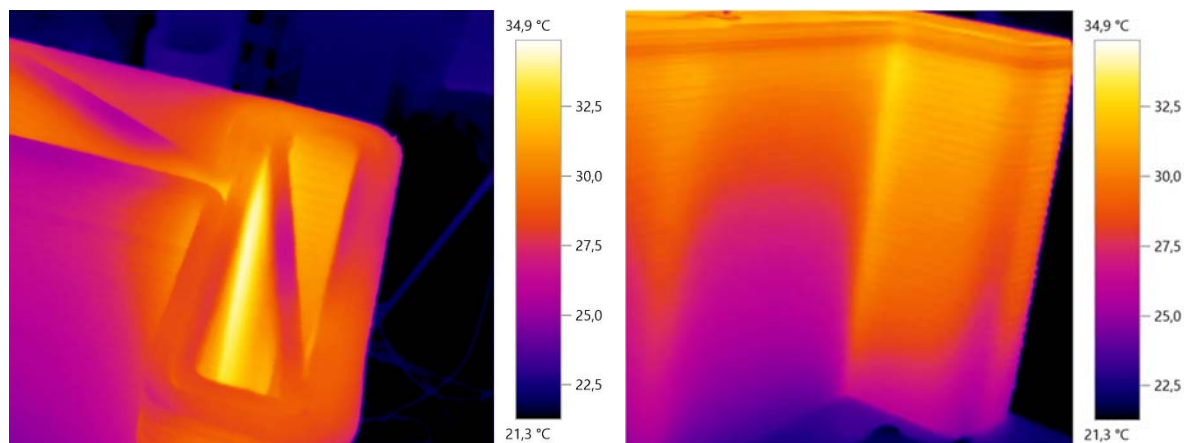
Pro online sledování průběhu teplot během tisku byla využita termokamera, která byla umístěna v blízkosti tištěného objektu a nakalibrována při úvodu tisku. Kamera byla umístěna tak, aby zachycovala v zorném poli optimálně celý prvek, případně aktuálně tištěné části. Snímkování bylo provádělo a zapisováno v intervalech reprezentující jednotlivé vrstvy tak aby bylo možné měření vyhodnotit a dodatečně zkalibrovat z hodnotami teplot získanými z teplotních čidel přímo v matici tištěného objektu.



Obrázek 20: Vlevo záznam začátku tisku na termokameru, vpravo termokamera

Jedním z úkolů online monitoringu bylo zachycení případných nehomogenit v objektu, co se tištěné směsi týče. V rámci tisku objektu a záznamu termokamerou bylo pro zkoušku v jedné vrstvě přerušeno dávkování urychlující přísady. Na Obrázku 21 je patrné, že daná vrstva je na snímku z termokamery viditelná. Při dostatečné vhodné rozlišovací schopnosti termokamery je tak možné tyto imperfekce dané změnou ve směsi monitorovat přímo při tisku.

Na tomtéž snímku (Obrázek 21) jsou patrné odlišným zabarvením i styky vnitřních žebér s vnější stěnou. Je možné touto metodou posuzovat případné poruchy (trhliny) od nerovnoměrného zahřívání konstrukce a podle výsledků proces tisku modifikovat.



Obrázek 21: Teplotní pole na vytištěném prvku

Pro zajištění kalibrovaného měření a minimalizaci chyb je potřeba zajistit základní předpoklady během tisku:

- eliminace průvanu a přímého slunečního záření,
- konstantní teplota okolí,
- použití stativu pro termokameru,
- stejná vzdálenost a úhel snímání po celou dobu měření.

Pro zvýšení přesnosti se často používá referenční ploška s definovanou emisivitou (např. matná černá páska), umístěná v blízkosti čidla Pt1000, sloužící jako stabilní kalibrační bod.

Omezení této metody spočívají v tom, že termokamera měří pouze povrch, je citlivá na změny emisivity v čase, měření předchází nutnost pečlivé kalibrace a funkčnost/použitelné metody je omezená při zakrytí povrchu (fólie, izolace).

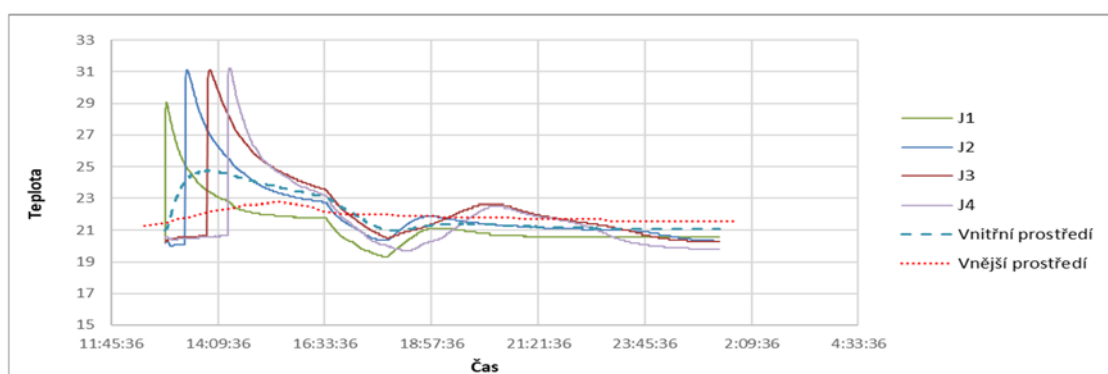
7.2. Monitoring teploty pomocí zabudovaných čidel

Ověření citlivosti snímání pomocí termokamery bylo podpořeno a kalibrováno teplotními čidly Pt1000 s ústřednou s kontinuálním záznamem teploty. Pt1000 je platinové odporové teplotní čidlo (RTD), jehož odpor při 0 °C činí 1000 Ω. Princip měření je založen na lineární závislosti elektrického odporu platiny na teplotě. Tato čidla byla při tisku instalována do tištěné konstrukce během tisku. Čidla Pt1000 se obvykle umísťují mezi jednotlivé tištěné vrstvy, do středu průřezu konstrukce (maximální teplota), k povrchu konstrukce (teplotní gradient a do referenčního okolního prostředí).

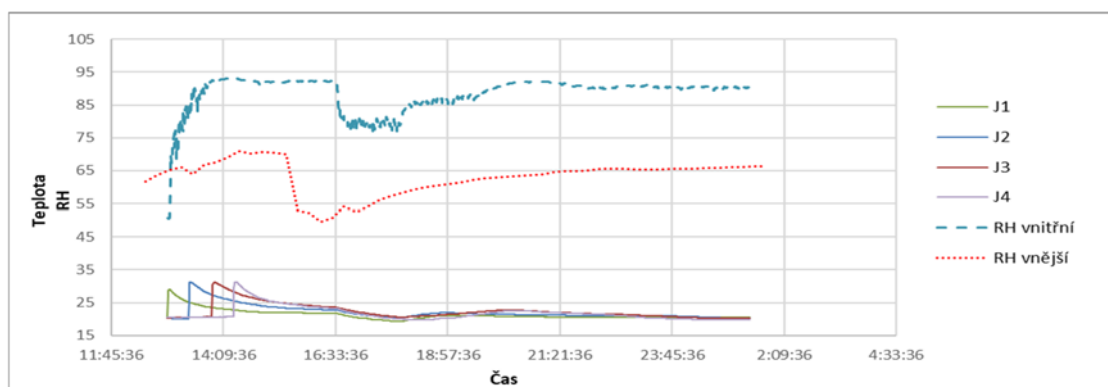
Jejich umístění bylo voleno záměrně různě po výšce objektu, aby byl zachycen i efekt postupného kompletního zahřívání prvku a urychlování procesu tuhnutí po výšce prvku. Účel měření byl z hlediska nastavení zpětného snímání povrchové teploty společně s předpokládanou teplotou uvnitř konstrukce. O tento teplotní rozdíl byl pro danou tloušťku konstrukce upraven model řízení. Vnější podmínky jsou v průběhu testu monitorovány vnějšími čidly (teplota a vlhkost).



Obrázek 22: Zabudovaná teplotní čidla během tisku



Obrázek 23: Typický průběh teplot uvnitř konstrukce



Obrázek 24: typický průběh teplot a vlhkosti

Měření teploty hydratace cementu pomocí čidel Pt1000 představuje spolehlivou a přesnou metodu monitorování raného vývoje 3D tištěných cementových konstrukcí. Technologie umožňuje detailní analýzu hydratačního procesu, optimalizaci tiskových parametrů a prevenci poruch spojených s teplotními napětími. Navázání bodového měření Pt1000 na termokameru představuje robustní experimentální metodiku, která kombinuje vysokou přesnost kontaktního měření s plošnou informací o teplotním poli. Správně provedená kalibrace umožňuje využít termokameru nejen kvalitativně, ale i kvantitativně při sledování hydratace 3D tištěných cementových konstrukcí. Protože termokamera měří pouze povrch rozdíl mezi Pt1000 a termokamerou reprezentuje tepelný tok a gradient, z čehož lze odhadovat intenzitu hydratace v objemu, míru odvodu tepla do okolí a riziko vzniku teplotních trhlin.

7.3. Implementace sledování teploty na tiskovou hlavu

Při 3D tisku cementových a betonových konstrukcí je teplota již uložené stopy jedním z klíčových parametrů, který přímo ovlivňuje možnost ukládání následující stopy a výslednou kvalitu konstrukce. Teplota stopy odráží aktuální stupeň hydratace cementu, reologický stav materiálu a vývoj raných mechanických vlastností. Z tohoto důvodu lze měření teploty chápat nejen jako diagnostický nástroj, ale jako aktivní prostředek řízení samotného tiskového procesu.

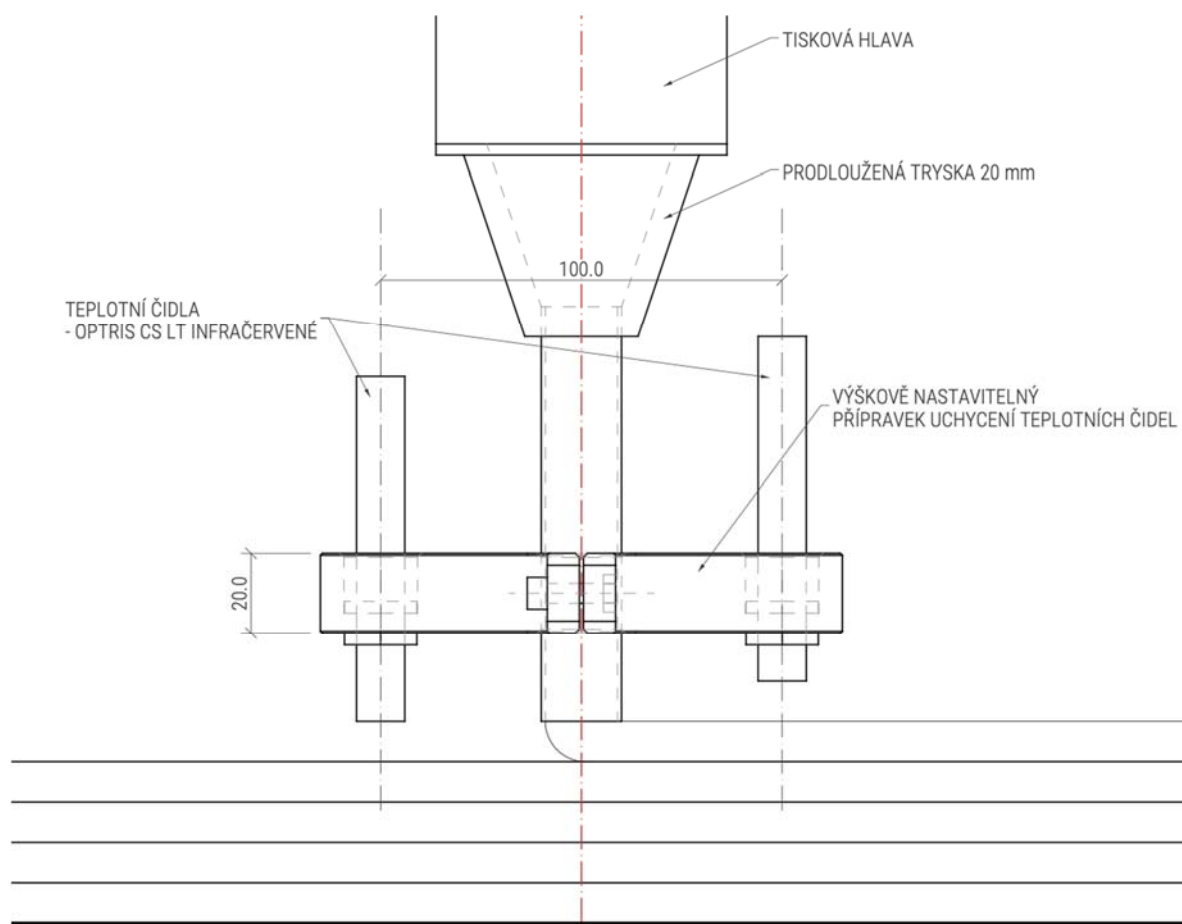
Bezprostředně po uložení stopy dochází k zahájení exotermické hydratace cementu, přičemž teplotní vývoj prochází typickými fázemi. V raném stádiu, kdy teplota stopy mírně roste nebo je stabilní, je materiál stále chemicky aktivní a povrch stopy vykazuje dobrou schopnost vytvořit mezivrstvé spojení s následující vrstvou. Pokud je další stopa uložena v tomto časovém a teplotním okně, dochází k efektivnímu spojení vrstev na rozhraní a ke vzniku soudržného, mechanicky kvalitního spoje. Naopak při pokročilé hydrataci, která se projevuje poklesem nebo stabilizací teploty na nižší úrovni, klesá reaktivita povrchu a zvyšuje se riziko vzniku tzv. studeného spoje.

Měření teploty horního povrchu již vytištěné stopy tak umožňuje nepřímo určovat její otevřený čas, tedy interval, ve kterém je ještě vhodné ukládat další materiál. Na základě teplotních dat lze upravovat časový odstup mezi jednotlivými stopami a přizpůsobovat tiskový program aktuálním podmínkám, například změnám okolní teploty nebo rozdílné geometrii tištěného prvku. V praxi lze definovat mezní teplotní hodnotu, pod kterou již není ukládání další stopy z hlediska kvality mezivrstvého spojení žádoucí.

Pro online sledování teploty tištěné konstrukce byl navržen systém kontinuálního monitoringu pomocí dvou teplotních senzorů. Sensory byly nainstalovány na tiskovou hlavu tak, aby byla měřena teplota tisknutého betonu a teplota podkladní vrstvy na kterou je tisk prováděn. Vzhledem k nemožnosti natáčení tiskové hlavy jde o snímání teploty při průjezdu zvoleným vhodným místem v dané stopě. Vyhodnocovaná teplota je navázána jednak na předchozí testy pomocí termokamery a také na měření pomocí teplotních čidel. Při výkyvu naměřených teplot lze pomocí online sledování regulovat proces tisku (rychlost, množství přísady atd). Typický záznam monitoringu teplot v průběhu tisku je zobrazen na Obrázku 27. Konstrukce uchycení snímačů teploty a schematicky řez je znázorněn na Obrázku 25 a 26.

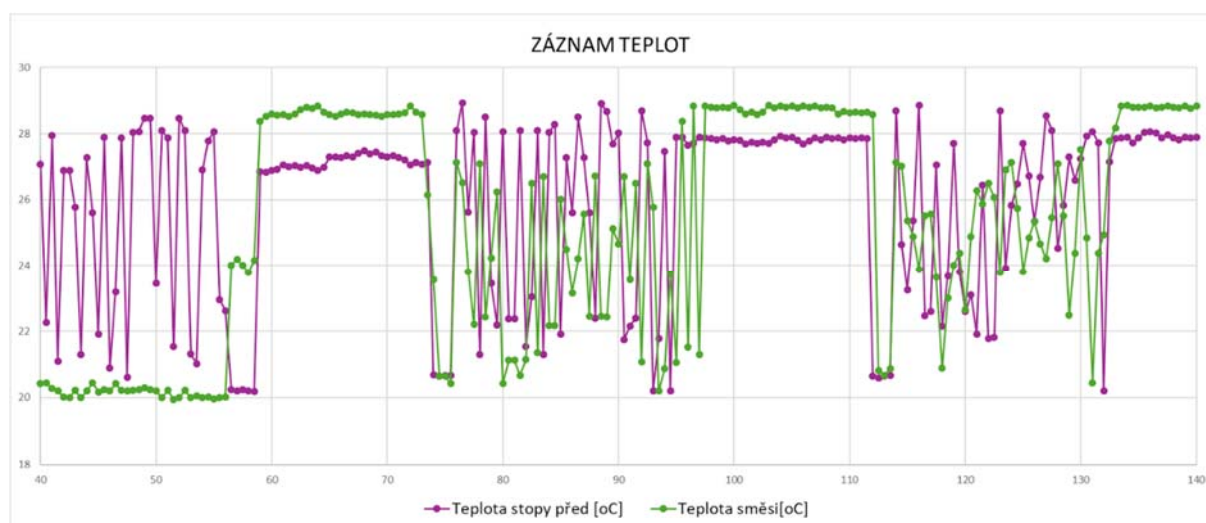


Obrázek 25: Teplotní senzory umístěné na tiskové hlavě.



Obrázek 26: Schema umístění senzorů při tisku na tiskové hlavě

Výsledkem procesu online monitoringu teploty je graf vycházející ze dvou hodnot teploty vrstvy ukládané a vrstvy na kterou je tištěno. Z obou teplot lze kontrolovat a zpětně řídit samotný tisk a modifikovat samotnou recepturu z hlediska množství vstříkovaného urychlovače, vody apod. Zároveň takto nastavené zařízení dává prostor na případné modifikace směsi z hlediska teploty (zahřívání, chlazení).



Obrázek 27: Typický graf záznamu teplot ze senzorů na tiskové hlavě během tisku.

8. ZÁVĚR

Zpracovaná ověřená technologie poskytuje experimentálně ověřený rámec pro řízení tuhnutí cementového kompozitu urychlovačem tuhnutí aplikovaným v tiskové hlavě. Klíčovým výstupem je popis vlivu teploty prostředí a teploty čerstvé směsi na rychlost nárůstu počáteční pevnosti a vytvoření modelu pro predikci času k dosažení pevnosti 0,2 MPa. Současně byla ověřena vhodnost ručního penetrometru jako in situ metody pro operativní kontrolu tuhnutí a posouzena využitelnost ultrazvukové metody. Navržený systém míchání koncentrovaného urychlovače s vodou umožňuje flexibilní nastavení dávky aktivní látky vůči cementu a představuje praktický nástroj pro optimalizaci tisku v závislosti na aktuálních podmínkách a požadované rychlosti tuhnutí.

Zpracovaná a experimentálně ověřená technologie je založena na komplexní kombinaci vzájemně provázaných měřicích a vyhodnocovacích metod, které společně umožňují spolehlivé sledování zrání 3D tištěných cementových konstrukcí.

Ověřená technologie zahrnuje následující rozhodující činnosti:

- a) kontinuální měření teploty tištěné směsi pomocí bodových čidel a bezkontaktní termografie,
- b) monitoring okolního prostředí a technologických parametrů 3D tisku.
- c) Interpretaci získaných dat o prostředí prostřednictvím navazujících zkušebních postupů, které umožňují hodnocení vývoje tuhnutí, reologického chování a homogenity struktury, a to způsobem, jenž není realizovatelný běžnými laboratorními metodami.

Praktické zkušenosti ukazují, že měření teploty během 3D tisku se jeví jako klíčový nástroj pro aktivní řízení procesu ukládání stop. Správná interpretace teplotních dat umožňuje optimalizovat časování ukládání jednotlivých vrstev, zlepšit kvalitu mezivrstvového spojení a zvýšit spolehlivost i mechanickou integritu 3D tištěné cementové konstrukce. Teplota je praktickým a snadno měřitelným parametrem, který propojuje materiálové chování cementové směsi s technologickým řízením 3D tisku. Teplota stopy zároveň souvisí s vývojem rané pevnosti materiálu. Vyšší teplota obvykle indikuje probíhající hydratační reakce a postupný nárůst únosnosti stopy, což je zásadní pro posouzení, zda je schopna přenést zatížení od dalších ukládaných vrstev bez nadměrné deformace. Měření teploty tak lze využít k odhadu maximálního počtu vrstev, které lze na danou stopu bezpečně uložit, a k prevenci porušení konstrukce vlivem vlastní tíhy v raném studiu tisku.

V kombinaci s termokamerou nebo bodovými čidly, lze sledovat nejen průměrnou teplotu stopy, ale i její prostorovou nehomogenitu. Rozdíly teplot mezi středem a okraji stopy nebo mezi jednotlivými úseky tiskové dráhy mohou signalizovat nerovnoměrnou hydrataci, rozdílné ochlazování nebo technologické problémy při tisku. Tyto informace lze využít k lokální úpravě rychlosti tisku, změně trajektorie nebo úpravě směsi (množství urychlovače).

Byla navržena metodika vstupní kontroly čerstvého cementového kompozitu pomocí zařízení Matest Plasticity meter C190, která představuje účinný nástroj pro operativní řízení procesu 3D tisku. Zásadními body metodiky jsou:

- okamžité měření po namíchání jako kritérium čerpatelnosti (≥ 16 jednotek),
- časová série měření v intervalu 0 až 5 minut pro sledování tixotropního nárůstu viskozity,
- statistické vyhodnocení dat a tvorba referenční křivky plasticity, která umožňuje dlouhodobé porovnávání nových dávek materiálu.

Metodika je vhodná pro praktické nasazení v laboratorním i poloprovozním měřítku a poskytuje standardizovaný rámec pro kontrolu stability směsi v čase, což je pro spolehlivý 3D tisk cementových kompozitů klíčové.

Kombinace jednotlivých přístupů vytváří ucelený systém, který poskytuje nejen aktuální informaci o stavu materiálu, ale také praktický podklad pro řízení procesu 3D tisku a hodnocení kvality výsledné konstrukce.